

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ
АППАРАТУРИ**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Лисенко О.М.

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 20__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра**

зі спеціальності 172 «ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА»
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему Логічний аналізатор на ПЛІС

Виконав: студент IV курсу, групи ДК-61

Алдохін Максим Денисович

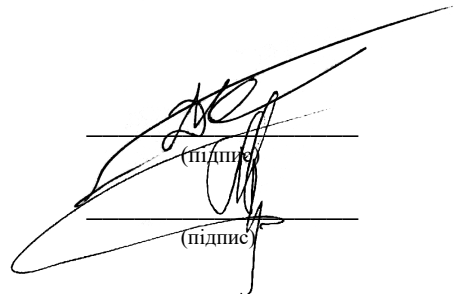
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доцент Кучернюк П.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)


(підпис)
(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр

Спеціальність 172 «ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Лисенко О.М.
(підпис) (прізвище ініціали)

«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Алдохіна Максима Денисовича
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема проєкту Логічний аналізатор на ПЛІС

керівник проєкту Кучернюк Павло Валентинович, доцент

затверджені наказом по університету від 25.05.2020 року №1196 с

2. Термін подання студентом проєкту 10 червня 2020 року

3. Вихідні дані до проєкту. Логічний аналізатор на ПЛІС має відповідати наступним вимогам:

- здатність системи детектувати цифрові сигнали на високій частоті і різних логічних рівнів;
- здатність системи детектувати аналогові сигнали;

- високий запас надійності системи;
- здатність системи працювати при «тяжких» температурних умовах;
- пристрій має виконувати цифрову обробку результатів вимірювань;
- можливість дистанційного під'єднання до пристрою;
- зручне та функціональне програмне забезпечення для користувача.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

- порівняння функціональних можливостей логічного аналізатора і осцилографа
- аналіз існуючих логічних аналізаторів;
- патентний пошук;
- розгляд принципу роботи логічного аналізатору;
- розробка структурної схеми та пояснення принципу роботи приладу;
- розробка схеми живлення приладу;
- вибір та обґрунтування елементної бази.
- розробка схеми електричної принципової;
- конструкторсько-технологічні розрахунки;
- обґрунтування вибору матеріалу друкованої плати;
- обґрунтування вибору класу точності друкованої плати;
- обґрунтування вибору методу виготовлення друкованої плати;
- розміщення компонентів на друкованій платі;
- проектування у Altium Designer;
- електричний розрахунок друкованої плати;
- розрахунок надійності друкованої плати;
- розрахунок віброміцності друкованої плати;
- розрахунок температурного режиму друкованої плати;
- розрахунок ціни приладу;

- розробка протоколу передачі даних між пристроєм і комп'ютером.
- написання програми для ПЛІС;
- написання програми для користувача на комп'ютер;
- висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо):

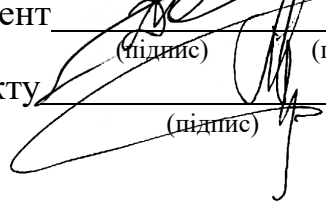
- креслення корпусу;
- креслення кришки;
- складальне креслення пристрою;
- схема електрична принципова;
- схема електрична структурна;
- друкована плата;
- складальне креслення друкованої плати.

6. Дата видачі завдання: вересень 2019 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання Дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Збір і аналіз літератури, патентний пошук, постановка завдання на проєктування	01.09.19-31.12.19	виконано
2	Аналіз технічного завдання	01.01.20-26.02.20	виконано
3	Вибір елементної бази та друкованої плати	26.02.20-02.04.20	виконано
4	Схемо-технічне проєктування	02.04.20-09.04.20	виконано
5	Виконання креслень схеми електричної принципової	09.04.20-23.04.20	виконано
6	Конструкторсько-технологічні розрахунки	23.04.20-30.04.20	виконано
7	Електричний розрахунок друкованої плати	30.04.20-07.05.20	виконано
8	Розрахунок віброміцності друкованої плати	07.05.20-14.05.20	виконано
9	Проєктування у Altium Designer	14.05.20-21.05.20	виконано
10	Виконання креслень друкованої плати та складального креслення друкованого вузла	21.05.20-28.05.20	виконано
11	Оформлення пояснювальної записки	28.05.20-10.06.20	виконано

Студент  Алдохін М.Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту  Кучернюк П.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Роботу викладено на 88 сторінках, вона містить 6 розділів, 21 ілюстрацію, 12 таблиць та 61 джерело в переліку посилань і 26 додатків.

Метою даної роботи є створення сучасного логічного аналізатора сигналів на ПЛІС, який здатен аналізувати аналогові й цифрові сигнали, при цьому має зручні інтерфейси керування як дротові, так і бездротові.

Методи, що використовувались у ході виконання дипломного проєкту: функціонального структурного синтезу, схемотехнічного проєктування, конструкторсько-технологічного проєктування, моделювання теплового стану системи, розрахунку надійносних характеристик, розробки програмного забезпечення відповідно сучасним тенденціям у програмуванні.

В ході дипломного проєкту були вирішені наступні задачі: проаналізовано літературні джерела та проведено патентний пошук; розроблено структурну схему; розроблено електричну принципову схему; проведено конструкторсько-технологічне проєктування друкованого вузлу; проведено конструкторсько-технологічний розрахунок; проведено електричний розрахунок, розрахунок віброміцності, надійності та теплового режиму роботи друкованої плати; створено програмне забезпечення для пристрою і комп'ютера, на базі плати для відлагоджування побудовано тестовий зразок;.

За результатами підготовлена публікація (тези доповіді на конференцію та стаття до фахового науково-технічного журналу «Електронна та Акустична Інженерія»).

Ключові слова — логічний аналізатор; ПЛІС; аналіз сигналів.

Summary

The work is presented on 88 pages, it contains 6 sections, 21 illustrations, 12 tables and 61 sources in the list of links and 26 applications.

The aim of this work is to create a modern logical signal analyzer for FPGAs, which is able to analyze analog and digital signals, while it has convenient control interfaces, both wire and wireless.

Methods that were used during the graduation project: functional structural synthesis, circuit design, technological design, simulation of the thermal state of the system, calculation of superelevation characteristics, software development in accordance with modern programming trends.

During the graduation project, the following tasks were solved: literary sources were analyzed and a patent search was conducted; developed block diagram; developed an electrical circuit diagram; conducting design and technological design of the printing unit; carrying out design and technological calculation; electrical calculation, calculation of vibration resistance, reliability and thermal operation of the printed circuit board; software was created for the device and the computer on the basis of the debug board; a test sample was built;.

Based on the results, a publication was prepared (abstract of the conference report, an article for the professional scientific and technical journal "Electronic and Acoustic Engineering").

Keywords – FPGA; Logic analyzer; signal analysis.

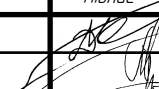


Пояснювальна записка до дипломного проєкту

на тему: Логічний аналізатор на ПЛІС

Київ – 2020

ЗМІСТ:

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ І НАПРАЦЮВАННЯ ВИМОГ ДО ОБ'ЄКТУ ПРОЄКТУВАННЯ	9
1.1 Порівняння функціональних можливостей логічного аналізатора і осцилографа	9
1.2 Аналіз існуючих логічних аналізаторів	11
1.3 Патентний пошук	13
1.4 Принцип роботи логічного аналізатора	14
1.4.1 Аналогові сигнали.....	15
1.4.2 Цифрові сигнали	17
Висновок розділу.....	20
РОЗДІЛ 2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ.....	22
2.1 Структурна схема та принцип роботи приладу.....	22
2.1.1 Обробка даних	23
2.1.2 Цифровий блок прийому даних.....	25
2.1.3 Аналоговий блок прийому даних	26
2.1.4 Оперативна пам'ять	27
2.1.5 Зовнішні інтерфейси	27
2.1.6 Датчик температури.....	28
2.2 Схема живлення приладу	28

					ДК61.4 16123.001ПЗ			
Изм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Логічний аналізатор на ПЛІС	Літ.	Аркуш	Арк.
Разроб.		М.Д.Алдохін					2	88
Перевірив.		П.В.Кучернюк				КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕЛ гр.ДК-61		
Н. Контр.		В.Г.Гудар						
Затвердив.		П.В.Кучернюк						

2.3	Вибір та обґрунтування елементної бази.....	29
2.3.1	Вибір системи на кристалі	29
2.3.2	Вибір АЦП	32
2.3.3	Розрахунок антиалайзінгових фільтрів для АЦП	34
2.3.4	Схема біполярного живлення	37
	Висновок розділу.....	39
РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК		
	ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ.....	40
3.1	Розрахунок мінімальної ширини друкованого провідника для ланцюгів живлення і землі по постійному струму.....	40
3.2	Розрахунок мінімальної ширини провідника з урахуванням допустимого падіння на ньому напруги	43
3.3	Номінальний діаметр контактного отвору	45
3.4	Діаметр контактного майданчика.....	45
3.5	Відстань між провідником та контактним майданчиком.....	48
	Висновок розділу.....	49
РОЗДІЛ 4 ПРОЄКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА		
4.1	Вибір типу та матеріалу друкованої плати.....	51
4.1.1	Матеріал друкованої плати	51
4.1.2	Шари друкованої плати	52
4.1.3	Міжшарові з'єднання.....	53
4.2	Вибір класу точності друкованої плати	53
4.3	Вибір методу виготовлення друкованої плати.....	54
4.4	Розміщення компонентів та трасування друкованої плати.....	55
4.5	Проектування друкованої плати	57

Висновок розділу.....	59
РОЗДІЛ 5 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ.....	60
5.1 Електричний розрахунок друкованої плати	60
5.1.1 Падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику.....	60
5.1.2 Потужність втрат.....	61
5.1.3 Ємність між двома сусідніми провідниками, які розташовуються на одній стороні ДП та мають однакову ширину	62
5.1.4 Взаємна індуктивність між двох паралельних провідників однакової довжини.....	63
5.2 Розрахунок надійності друкованого вузла.....	63
5.3 Розрахунок віброміцності друкованої плати	68
5.4 Розрахунок температурного режиму роботи приладу.....	72
5.5 Розрахунок ціни виробу	72
Висновок розділу.....	73
РОЗДІЛ 6 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	74
6.1 Протокол передачі даних.....	74
6.2 Програма на FPGA	75
6.3 Програма на ПК	76
Висновок розділу.....	79
ВИСНОВОК.....	80
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	83
ДОДАТОК А Технічне завдання на проєктування.....	89
ДОДАТОК Б Патентний пошук.....	94

ДОДАТОК В Блок-схема АЦП.....	97
ДОДАТОК Г Технічна документація на елементи.....	98
ДОДАТОК Д Розрахунок струму і потужності SOC.....	101
ДОДАТОК Е Вживаний струм для 5 В.....	109
ДОДАТОК Ж Ширина провідника за IPC2221	111
ДОДАТОК И Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму	112
ДОДАТОК К Розрахунок номінального діаметра контактного отвору ..	119
ДОДАТОК Л Розрахунок діаметра контактної майданчика.....	122
ДОДАТОК М Основні параметри класу точності	124
ДОДАТОК Н Шари друкованої плати	125
ДОДАТОК П Технологічний процес виготовлення друкованої плати ...	126
ДОДАТОК Р Трасування друкованої плати.....	128
ДОДАТОК С Розрахунок ємності між шарами ДП.....	132
ДОДАТОК Т Розрахунок інтенсивності відмов приладу	134
ДОДАТОК У Дані маси, ціни, температур елементів ДП	152
ДОДАТОК Ф Температурний режим роботи приладу	166
ДОДАТОК Х Програмний модуль	168
ДОДАТОК Ц Дизайн програмного модулю.....	169
ДОДАТОК Ш Номінали резисторів.....	170
ДОДАТОК Щ Номінали конденсаторів.....	172
ДОДАТОК Ю Номінали індуктивностей	175
ДОДАТОК Я Прилад. Специфікація.....	176
ДОДАТОК АА Логічний аналізатор на ПЛІС. Специфікація.....	178
ДОДАТОК АБ Логічний аналізатор на ПЛІС. Перелік елементів.....	179

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

ТЗ	технічне завдання
МЗР	молодший значущий розряд
ПК	персональний комп'ютер
ДП	друкована плата
ПМ	посадкове місце
ДМ	друкований монтаж
КЕ	конструктивний елемент
МО	монтажний отвір
КМ	контактний майданчик
КО	контактний отвір
SD	портативна флеш-карта пам'яті
VDD	живлення
VSS, GND	земля
ОЗУ	оперативна пам'ять
SPI, QSPI	послідовний інтерфейс
I2C	послідовний інтерфейс
SO	тип корпусу
C	конденсатор
R	резистор
DD	цифрова мікросхема
DC-DC	перетворювач постійних напруг
CLK, SCK	тактова частота
CS	дозволу запису у SPI
MOSI	данні від майстра до підлеглого у SPI
MISO	данні від підлеглого до майстра у SPI
PLL	блок перетворювання частоти
SOC	система на кристалі

ВСТУП

Для розв'язання задач, пов'язаних з вимірюванням параметрів електричних, аналогових та цифрових сигналів, що змінюються, широко використовуються логічні аналізатори. У випадках, коли постає задача одночасного контролювання багатьох цифрових інформаційних сигналів для виявлення, наприклад, помилки в синхронізації чи передачі, доречно використовувати логічні аналізатори. Особливо це стосується процедур тестування та налагодження сучасних електронних пристроїв на базі мікроконтролерів або ПЛІС, які потребують одночасної обробки декількох сигналів зі зміною їх у часовій області та можливістю декодування в реальному часі. Логічні аналізатори дуже корисні для дослідження даних, що передаються по шині, бо вони можуть декодувати інформацію на шинах мікропроцесорів і відображати її у вигляді кодів, вони подають сигнали саме так, як бачить їх устаткування.

Аналіз ринку сучасних логічних аналізаторів [1] [2] виявив, що жоден не має можливості бездротового під'єднання та лише мала частина з них може аналізувати аналогові сигнали. Крім того, вони мають високу вартість, обмежені універсальність та частотний діапазон сигналів.

Метою даної роботи є розробка архітектурного рішення для подальшої реалізації багатофункціонального й універсального логічного аналізатора на базі технології FPGA, що мав би змогу аналізувати як цифрові, так і аналогові сигнали, можливість дротового та бездротового під'єднання до пристрою, компактні розміри та прийнятну ціну.

Для розв'язання даної задачі необхідно провести аналіз ринку, вивчити принципи роботи логічних аналізаторів та визначитися з характеристиками пристрою, що розробляється. Після цього потрібно зробити схемотехнічне проектування, яке буде містити розробку структурної схеми та схеми живлення пристрою, вибір елементної бази, а потім – розробку схеми електричної

					ДК61.416123.001ПЗ	7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

принципової. Далі необхідно провести конструкторсько-технічні розрахунки, спроектувати друковану плату, а саме: обрати тип, матеріал, клас точності та метод її виготовлення, а потім розмістити компоненти на платі та зробити трасування. Для підтвердження конструкторсько-технологічних рішень потрібно буде зробити електричний розрахунок друкованої плати, розрахунки надійності та віброміцності друкованого вузла та температурного режиму роботи приладу. Крім того, необхідно розробити алгоритми прийому, обробки та передачі сигналів, програмне забезпечення для мікроконтролера та для користувача на персональний комп'ютер.

У підсумку ми повинні отримати комплект технічної документації на логічний аналізатор, що відповідає заявленим вимогам, та програмне забезпечення для мікроконтролера й на персональний комп'ютер.

Пояснювальна записка складається з шістьох розділів.

У розділі 1 аналізується ринок сучасних логічних аналізаторів та формуються вимоги до пристрою, що розробляється.

У розділі 2 розробляється структурна схема пристрою, визначаються принципи його роботи, проводиться вибір та обґрунтування елементної бази, розробляється схема електрична принципова.

У розділі 3 проводяться конструкторсько-технологічні розрахунки, які необхідні для виконання розміщення елементів на друкованій платі та її трасування.

У розділі 4 обираються тип, матеріал, клас точності та метод виготовлення друкованої плати, проводиться розміщення компонентів на платі та її трасування.

У розділі 5 проводяться розрахунки, що підтверджують правильність конструкторсько-технологічних рішень, прийнятих при розробці пристрою.

У розділі 6 розробляється програмне забезпечення на FPGA та ПК.

Проектна апробація результатів проводиться на міжнародній науково-технічній XIII конференції молодих вчених «Електроніка – 2020».

					ДК61.416123.001ПЗ	8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ І НАПРАЦЮВАННЯ ВИМОГ ДО ОБ'ЄКТУ ПРОЄКТУВАННЯ

Логічний аналізатор – це електронний прилад, який захоплює і відображає декілька сигналів від цифрової системи або цифрової схеми. Логічний аналізатор може перетворювати захоплені дані в часові діаграми, декодувати протоколи, контролювати кінцеві автомати, розпізнавати мову асемблер. Логічні аналізатори мають розширені можливості реагування на логічні сигнали, коли користувачеві необхідно побачити часові відношення між багатьма сигналами в цифровій системі [3].

Логічний аналізатор у звичайному уявленні придатний для аналізу тільки цифрових сигналів. Але зараз на ринку є рішення, які пропонують елементарний аналіз і аналогової частини. Швидкість такого «осцилографу» досить мала, у порівнянні з дорожчими представниками, натомість він має компактні розміри й дуже зручне застосування.

1.1 Порівняння функціональних можливостей логічного аналізатора і осцилографа

Логічні аналізатори не дуже знайомі інженерам і винахідникам, багато хто з них вважає їх іграшкою і віддає перевагу осцилографу. Водночас осцилограф втрачає всі переваги, коли перед фахівцем постає питання про аналіз паралельної високошвидкісної шини даних. Але це не всі завдання, у яких логічний аналізатор набагато корисніший, ніж осцилограф. Порівняння функціональних переваг наведено у таблиця 1.1 [4].

					ДК61.416123.001ПЗ	9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Порівняння можливостей логічного аналізатора і осцилографа

Осцилограф	Логічний аналізатор
Коли потрібно побачити невеликі послідовності сигналу	Коли потрібно побачити багато сигналів одночасно
Коли потрібна висока точність при визначенні часових інтервалів	Коли потрібно подати сигнали саме так, як бачить їх устаткування
	Якщо потрібно синхронізуватися від певної комбінації сигналів на декількох лініях і побачити результат

Коли сигнал у системі перетинає порогове значення, логічний аналізатор реагує на нього так само, як і сама логічна схема. Він розпізнає лише два стани сигналу – «нуль» або «одиниця». Крім того, логічний аналізатор може розпочати запис даних з певної послідовності нулів і одиниць досліджуваних сигналів.

Взагалі, використання логічного аналізатору оптимально тоді, коли вам потрібно побачити більше сигналів, ніж може показати осцилограф. Логічні аналізатори дуже корисні для визначення тимчасових співвідношень або для дослідження даних, що передаються по шині, наприклад, адреса даних або керуючих сигналів на шині мікропроцесора. Вони можуть декодувати інформацію на шинах мікропроцесорів і відображати її у вигляді коду (ASCII, UTF-8, HEX, RGB, UNICODE).

При дослідженні часових співвідношень між багатьма сигналами постає задача синхронізації за певним поєднанням логічних рівнів цих сигналів. Для розв'язання цієї задачі потрібен логічний аналізатор, а не осцилограф. [4]

1.2 Аналіз існуючих логічних аналізаторів

На ринку є велике різноманіття логічних аналізаторів. Всі вони мають свої переваги і недоліки. Тож для розробки конкурентного рішення потрібен аналіз ринку. Було обрано ряд пропозицій портативних¹⁾ логічних аналізаторів від таких компаній: АКИП, Digilent Inc., DigiView, Saleae.

Розглянемо основні характеристики кожного з них (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Порівняння логічних аналізаторів

Параметр	АКИП-9103/1 [5]	Logic Pro 16 [2]	DigiView DV3500 [1]	Analog Discovery 2 [6]	DigiView DV509 [1]
Ціна ²⁾ , грн	28000	27000	27000	7500	13000
Цифровий сигнал					
Кіл. каналів	32	16	36	16	9
Частота дискр., МГц	200	500	500	100	1000
Мак. частота сигналу, МГц	75	100	100	20	300
З'єднання з ПК	USB2.0	USB3.0	USB2.0	USB2.0	USB3.0
Логічні рівні, В	-6 – 6	1,2 – 5,5	-5 – 5	-5 – 5	-4 – 4

¹ Портативний – це пристрій, який можна взяти завжди з собою і він не буде займати багато місця.

² Ціни вказані на 6 травня 2020 року.

Продовження Таблиця 1.2

Параметр	АКИП-9103/1 [5]	Logic Pro 16 [2]	DigiView DV3500 [1]	Analog Discovery 2 [6]	DigiView DV509 [1]
Декодування ³	-	RS-232, 422/3, 285	RS-232	-	RS-232
Аналоговий сигнал					
Наявність	-	+	-	+	-
Швидкість дискр., МГц	-	5	-	100	-
Розрядність, Біт	-	12	-	14	-

На ринку останнім часом почали з'являтися пристрої з можливістю аналізу аналогових сигналів. Тому, для збільшення привабливості та розширення функціоналу необхідно передбачити можливість аналізу як цифрових, так і аналогових сигналів.

З аналізу попередньої таблиці можна зробити ряд висновків для створення конкурентного продукту, таких як:

- кількість цифрових каналів повинна бути мінімально 16;
- частота дискретизації цифрових сигналів більше 200 МГц;
- максимальна частота захвату цифрового сигналу, який зможе аналізувати пристрій більше 50 МГц;
- протокол з'єднання з ПК – USB2.0/3.0;
- логічні рівні від 1,2 В до 5 В;

³ Декодування вхідних цифрових сигналів, крім UART, SPI, I²C, цю можливість мають усі заявлені пристрої

- обов'язкове декодування UART, SPI, I²C.

У сучасних пристроях широко використовується Ethernet — мережевий протокол передачі даних. Це дозволяє об'єднувати декілька пристроїв у групи і розширювати їх можливості. З'являється варіант використання пристрою пасивно, тільки для фіксації якихось надзвичайних випадків і під'єднання до нього тільки в моменти, коли сталася аварія чи для діагностування. Також цей інтерфейс дозволяє збільшити швидкість передачі даних до 1 ГБ/с, що дає змогу надсилати дані в режимі реального часу. Тому треба передбачити можливість використання Ethernet у пристрої.

Після вивчення ринку не було виявлено пристроїв, які б мали можливість бездротового під'єднання. Хоча це дуже зручно для роботи в складних умовах, коли немає можливості дротового під'єднання до пристрою. Наприклад, бурові станції, де є багато різного обладнання, яке може ламатися, і немає змоги зручно пересуватися з великим комп'ютером через відсутність місця.

Для створення унікального пристрою необхідно передбачити можливість бездротового під'єднання до керуючого приладу. Як бездротовий інтерфейс передачі даних доцільно використати Wi-Fi протокол. Це обумовлено такими факторами: дуже велика розповсюдженість, універсальність, ціна, стабільність з'єднання і радіус стабільного з'єднання пристроїв.

1.3 Патентний пошук

Для перевірки на унікальність пристрою, що розробляється, було проведено патентний пошук.

Патент — охоронний документ, що засвідчує пріоритет, авторство і право власності на винахід (корисну модель). [7] Пошук патентів треба проводити у всіх реєстрах країн, у яких планується використовувати чи продавати пристрій (Україна, США, Європа та інші.). Для спрощення задачі використовувався

					ДК61.416123.001ПЗ	13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спеціальний сайт, який шукає по всіх реєстрах всіх держав, такий як Espacenet [8].

Для пошуку використовувалися запити тільки англійською мовою, тому що це міжнародна мова. Зроблено декілька запитів та проаналізовані патенти [9] [10] [11].

У патенті [9] аналізуються тільки цифрові сигнали, пропонується аналізувати аналогові та цифрові сигнали. Використовується FPGA, а в пристрої, який розробляється, пропонується використовувати SOC. У патенті також використовується сенсорний дисплей. За розрахунками це значно підвищить ціну пристрою і збільшить розміри, але функціональність не збільшить. З цього можна зробити висновок, що патент та пристрій, що розробляється, не повторюються.

Патент [10] на аналіз і зчитування логічним аналізатором цифрового і аналогового сигналу. Він 1989 року, у ньому використані застарілі технології, такі як: аналоговий сигнал виводиться в аналоговій формі. Також робота з пам'яттю виконується в SOC і не містить генераторів помилок чи інших речей.

Патент [11] використовує можливість модульного під'єднання аналогової частини до цифрового аналізатора, а потім зчитування цих даних по паралельному цифровому інтерфейсу. Цей патент не збігається з ідеєю приладу, який розробляється.

У результаті не було знайдено патентів на прилади з аналогічними характеристиками. Докладніше патентний пошук наведено у додатку Б.

1.4 Принцип роботи логічного аналізатора

Розглянемо принцип роботи логічного аналізатора. Пристрій може аналізувати цифрові і аналогові сигнали. Принцип аналізу і характеристики, якими описується кожен із сигналів, відрізняються. Розглянемо їх детальніше.

					ДК61.416123.001ПЗ	14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4.1 Аналогові сигнали

Аналоговий сигнал – це хвиля неперервно змінного сигналу. Для відображення на цифрових пристроях, таких як: монітор комп'ютера, смартфон, цифрові мультиметри й осцилографи, потрібно знехтувати точністю й перетворити його на цифровий. Це вносить певні похибки, які будуть розглянуті далі.

Щоб перетворити звичайний синусоїдальний сигнал на цифровий, потрібно провести такий ряд заходів:

- дискретизація сигналу;
- квантування сигналу.

Дискретизація сигналу відповідає за отримання значень амплітуди сигналу з певною частотою (частотою дискретизації). Ця характеристика відповідає за частоту відцифрування сигналу (швидкість АЦП).

Квантування – етап, на якому дискретизований сигнал округляється до одного з двох рівнів (більшого чи меншого). Ця характеристика відповідає за роздільну здатність АЦП (бітність АЦП).

Розглянемо детальніше похибки, які виникають при перетворенні аналогового сигналу на цифровий. Є декілька джерел виникнення похибок, це: квантування, нелінійність, апертурна похибка (джитер).

Похибки квантування є наслідком обмеженої розрядності АЦП, Цей недолік не може бути усунено за жодного типу аналогово-цифрового перетворення. Абсолютна величина похибки квантування кожного відліку знаходиться в межах від нуля до половини молодшого значущого розряду (МЗР). Як правило, амплітуда вхідного сигналу значно більша, ніж МЗР. У цьому випадку похибка квантування не корелюється з сигналом і має рівномірний розподіл. Її середньоквадратичне значення збігається з середньоквадратичним відхиленням розподілу, який дорівнює (1.1).

$$|max[e(nT)]| = \frac{1}{m} 2^{-b} = \frac{1}{m} Q, \quad (1.1)$$

де b — число розрядів квантування (сигналу $e(nT)$);

Q — крок квантування;

$m = 2$ — у випадку округлення (у випадку усікання 1). [12]

У випадку 12-бітового АЦП це складе 0,012% від повного діапазону сигналу при округленні.

АЦП властиві похибки, пов'язані з **нелінійністю**, що наслідком фізичної недосконалості АЦП. Це призводить до того, що передавальна характеристика відрізняється від лінійної (точніше від бажаної функції, оскільки вона не обов'язково лінійна). Похибки можуть бути зменшені шляхом калібрування.

Апертурна похибка (джитер) — небажані фазові та частотні випадкові спотворення під час передачі сигналу. Виникають внаслідок нестабільності тактового генератора, змін параметрів лінії передачі в часі та різної швидкості поширення частотних складових того ж самого сигналу. Джитер може впливати на цифровий сигнал у двох широких областях: у процесі перетворення аналогового сигналу в цифрову форму за допомогою АЦП, або у зворотному напрямку — за допомогою ЦАП, а також при передачі у цифровому вигляді.

Джитером дискретизації або джитером семплінгу (sampling jitter) називають похибки вибору моментів часу квантування в процесі оцифровки сигналів у АЦП, при перетворенні цифрового сигналу в аналоговий вигляд в ЦАП або в перетворювачах частоти дискретизації (SRC). Велике значення джитера в перерахованих випадках може призвести до чутного погіршення якості сигналу. У цифрових антенних решітках джитер призводить до похибок виміру напрямків приходу сигналів та зниження завадозахищеності. [13] [14] Цей ефект можна спрогнозувати, якщо похибка досить невелика відносна похибки квантування. Таким чином, можна отримати (1.2). [15]

$$\Delta t < \frac{1}{2^q \pi f_0}, \quad (1.2)$$

де q — розрядність АЦП, біт;

f_0 — частота вхідного аналогового сигналу, Гц.

Після розгляду наведених аспектів і тонкощів виміру аналогових сигналів, пристрій зможе вимірювати такий ряд параметрів:

- частота;
- амплітуда;
- довжина хвилі.

Частота сигналу, який може вимірювати пристрій, повинна бути вдвічі менша за частоту дискретизації АЦП, за теоремою Котельникова, (теорема Найквіста – Шеннона). Але оскільки розробляється прилад для вимірювання, цей показник повинен бути більш ніж у два рази менше, тому розрахунки будуть вестись за рівнянням (1.3).

$$f_d = 4f_a, \quad (1.3)$$

де f_d – частота дискретизації, Гц;

f_a – максимальна частота аналогового сигналу, Гц.

Максимальна амплітуда сигналу визначається обраним АЦП. Довжина хвилі розраховується за формулою (1.4).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1.4)$$

1.4.2 Цифрові сигнали

Принцип ідентифікування сигналу. На відміну від осцилографа, для збільшення швидкості обробки та кількості сигналів, що вимірюються, у логічних аналізаторах зберігають у пам'яті не повністю весь сигнал, а лише логічні рівні. Як наслідок, будь-який сигнал, що лежить у межах логічних рівнів, буде поданий набором логічних нулів або одиниць.

Аналізатор тимчасових діаграм перетворює всі сигнали на прямокутні, що, на перший погляд, обмежує його можливості. Проте для розв'язання задач, в яких потрібно проаналізувати тимчасові співвідношення декількох сотень сигналів шляхом одночасного їх спостереження, потрібен саме логічний аналізатор. Важливо пам'ятати, що кожна точка дискретизації використовує

одну комірку пам'яті. Тому, чим вище роздільна здатність (більша їх кількість), тим менше вікно захоплення.

Дискретизація переходів. При захопленні пакетних даних, як показано на (рисунок 1.1), потрібно вибрати максимальну роздільну здатність (наприклад, 4 нс. (25 ГГц), щоб захопити швидкі імпульси на самому початку. Це означає, що аналізатор тимчасових діаграм з обсягом пам'яті 4К (4096 відліків) припинить захоплення даних через 16,4 мкс, і другий пакет даних буде втрачений.

При налагодженні постійно доводиться реєструвати й зберігати дані в моменти, коли активність сигналу відсутня. Це призводить до марної витрати пам'яті аналізатора, не даючи ніякої додаткової інформації. Цю проблему можна вирішити, якщо знати, в які моменти часу виникає перехідний процес і якою буде полярність сигналу – позитивною або негативною. Ця інформація становить основу аналізу переходів і дозволяє підвищити ефективність використання пам'яті.

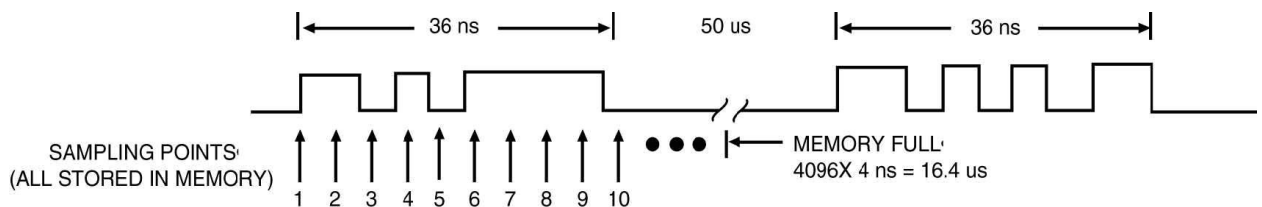


Рисунок 1.1- Дискретизація з високою роздільною здатністю

- Точки дискретизації (всі зберігаються в пам'яті)
- 36 нс.
- 50 мкс.
- Пам'ять заповнена

Якщо комірок пам'яті 4096, а записувати дані кожні 4 нс, то вистачить на 16,4 мкс.

Для реалізації ефективного аналізу переходів потрібно використовувати на вході аналізатора тимчасових діаграм «детектор переходів» і лічильник.

Тепер аналізатор буде зберігати тільки ті відліки, яким передував перехід, разом із часом, який пройшов від останнього переходу. При такому підході використовується всього два відділення пам'яті на кожен перехід, а при відсутності активності – пам'ять взагалі не використовується. Приклад такого запису зображено на (рисунок 1.2).

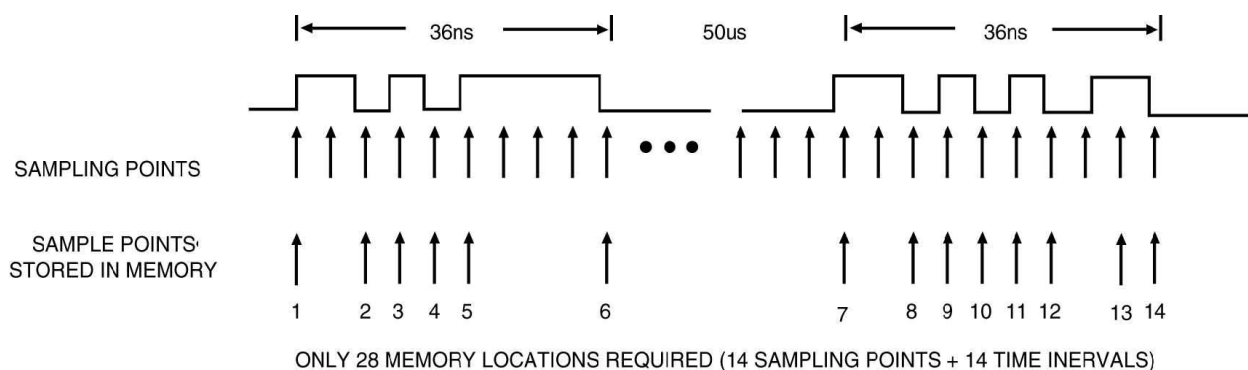


Рисунок 1.2 - Дискретизація з детектором переходів

- Точки дискретизації
- Точки дискретизації, збережені в пам'яті
- 36 нс.
- 50 мкс.
- Було потрібно всього 28 осередків пам'яті (14 точок дискретизації та 14 проміжків часу)

Синхронізація аналізатора часових діаграм. Визначення умов трасування для аналізатора часових діаграм дещо відрізняється від налаштування рівня синхронізації осцилографа. Багато аналізаторів можуть синхронізуватися від певного поєднання нулів і одиниць на входних лініях. Для полегшення роботи умови синхронізації в більшості аналізаторів можна вводити у вигляді двійкових (нулів і одиниць), шістнадцяткових, вісімкових або десяткових чисел, або у вигляді символів ASCII. Використання шістнадцяткових чисел дуже зручно для аналізу шин, що мають розрядність 4 біт, 8 біт, 16 біт, 24 біти або 32 біти.

Синхронізація по фронту. Налаштування рівня запуску в осцилографі можна уявити, як установку рівня на компараторі, який викликає запуск осцилографа, коли вхідна напруга перетинає цей рівень. При синхронізації по фронту аналізатор тимчасових діаграм працює, по суті, так само, за винятком того, що рівень запуску визначається установкою логічного порогу. Хоча багато логічних пристроїв реагують на рівень, тактові і керуючі сигнали цих пристроїв працюють, як правило, по фронту. Синхронізація по фронту дозволяє почати захоплення даних у момент тактування пристрою. Можна налаштувати аналізатор так, щоб він починав захоплення даних при появі фронту тактової частоти (переднього або заднього) і захоплював усі виходи регістра зсуву. Звичайно, у такому випадку потрібно забезпечити затримку точки трасування, щоб врахувати затримку поширення в регістрі зсуву.

Параметри, які характеризують цифровий сигнал:

- частота;
- прогальність.

Прогальність – одна з класифікаційних ознак імпульсних систем, безрозмірний коефіцієнт, який характеризує періодичний імпульсний процес і чисельно дорівнює відношенню періоду повторення імпульсу до його ефективної тривалості. [16] Прогальність обчислюється за формулою (1.5).

$$S = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{D}, \quad (1.5)$$

де S – прогальність;

D – коефіцієнт заповнення;

T – період імпульсів, с;

τ – тривалість імпульсу, с.

Висновок розділу

У розділі були проаналізовані конкурентні рішення на ринку. На підставі чого були визначені основні параметри приладу, що розробляється:

					ДК61.416123.001ПЗ	20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- цифрова частина:
 - 24 канали;
 - частота дискретизації 300 МГц;
 - максимальна частота сигналу 50 МГц;
 - логічні рівні від 1,2 В до 3 В;
- аналогова частина:
 - 8 каналів;
 - частота дискретизації 800 кГц;
 - логічні рівні ± 3 В;
 - максимальна частота сигналу 250 кГц за формулою (1.3);
- протокол передачі даних на ПК: Wi-Fi, USB, Ethernet;

Проведено патентний пошук, у результаті чого не було знайдено патентів на прилади з аналогічними характеристиками.

Також було розглянуто теоретичні аспекти принципу захвату і аналізу цифрових і аналогових сигналів. Розглянуто можливі причини виникнення похибок і їх характеристики.

На підставі проведеного аналізу сформовано ТЗ до пристрою (додаток А) визначені задачі, які будуть розв'язані в ході проєктування:

- розробка принципу роботи приладу;
- розробка структурної схеми приладу;
- вибір і обґрунтування елементної бази;
- розробка схеми електричної принципової;
- розробка креслень друкованої плати;
- розрахунок характеристик надійності приладу;
- розрахунок характеристик основних параметрів приладу;
- розробка програмного забезпечення для плати;
- розробка програмного забезпечення для комп'ютера;
- тестування роботи приладу.

РОЗДІЛ 2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ

У розділі буде вирішено питання створення структурної схеми пристрою згідно з вимогами ТЗ, розробленого в попередньому розділі.

2.1 Структурна схема та принцип роботи приладу

Для проєктування та подальшої реалізації пристрою згідно з ТЗ пропонується наступна структурна схема приладу (рисунок 2.1).

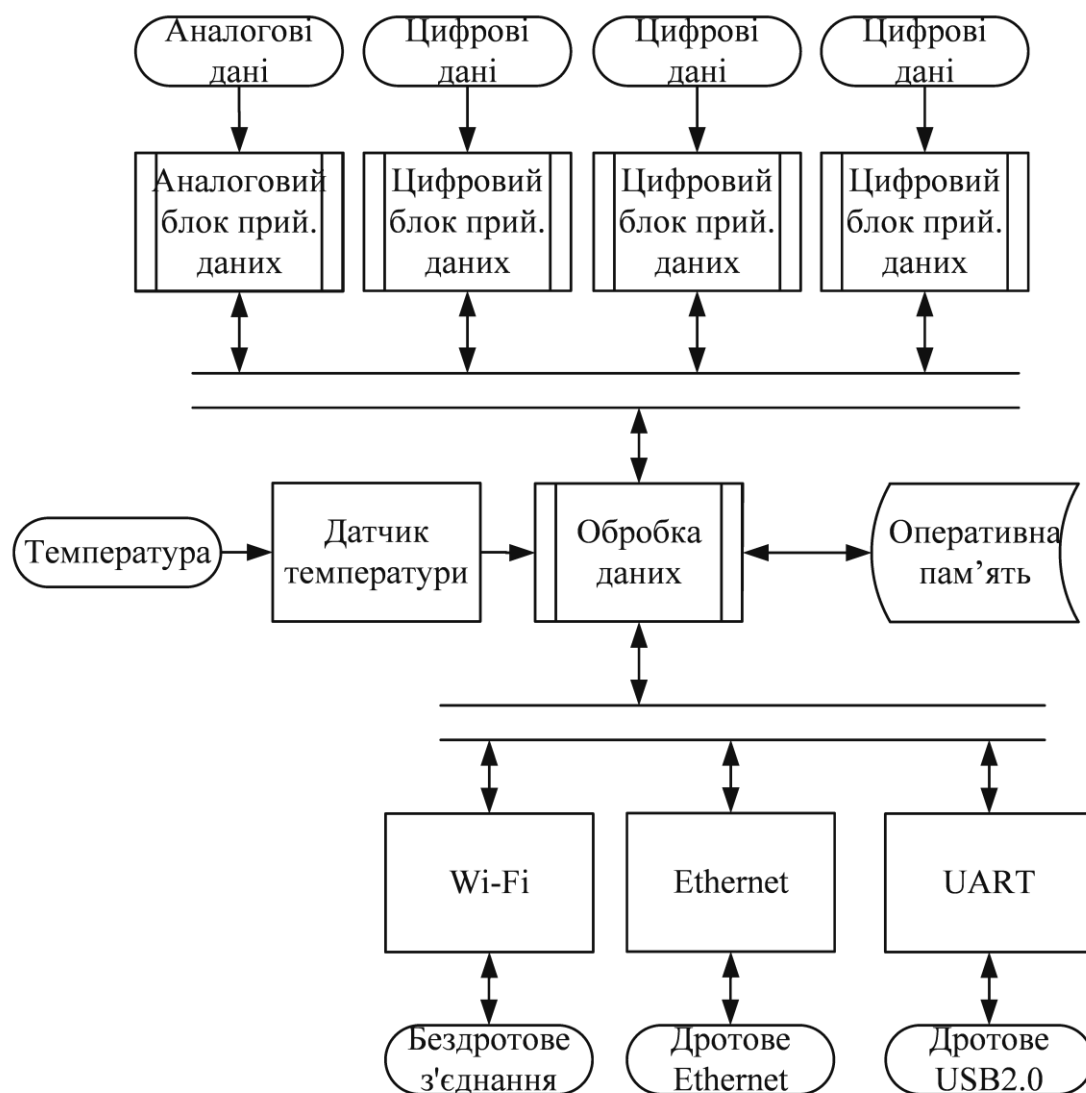


Рисунок 2.1 – Блок- схема пристрою

Пристрій складається з таких логічних блоків:

- обробка даних (розділ 2.1.1);
- цифровий блок прийому даних (розділ 2.1.2);
- аналоговий блок прийому даних (розділ 2.1.3);
- оперативна пам'ять (розділ 2.1.4);
- Wi-Fi (розділ 2.1.5);
- UART (розділ 2.1.5);
- Ethernet (розділ 2.1.5);
- датчик температури (розділ 2.1.6).

2.1.1 Обробка даних

За блок **обробки даних**, який буде обробляти дані, було обрано SOC (англ. System-on-a-Chip, укр. Система на кристалі). Тобто це один кристал кремнію, який має в собі частину програмованої логіки, а частину процесора на базі архітектури ARM. Функціональне призначення ПЛІС – виявлення і розпізнавання даних, а потім надсилання їх до процесора. Процесор, у свою чергу, записує нові дані у тимчасову пам'ять і виконує відправку. За доступними йому протоколами надсилає дані на відповідні блоки відправки, які будуть розглянуті далі. Блок-схема цього блоку наведена на (рисунок 2.2).

Блок включає в себе:

- SOC;
- блок тактування;
- постійна пам'ять;
- JTAG інтерфейс;
- SD – card інтерфейс.

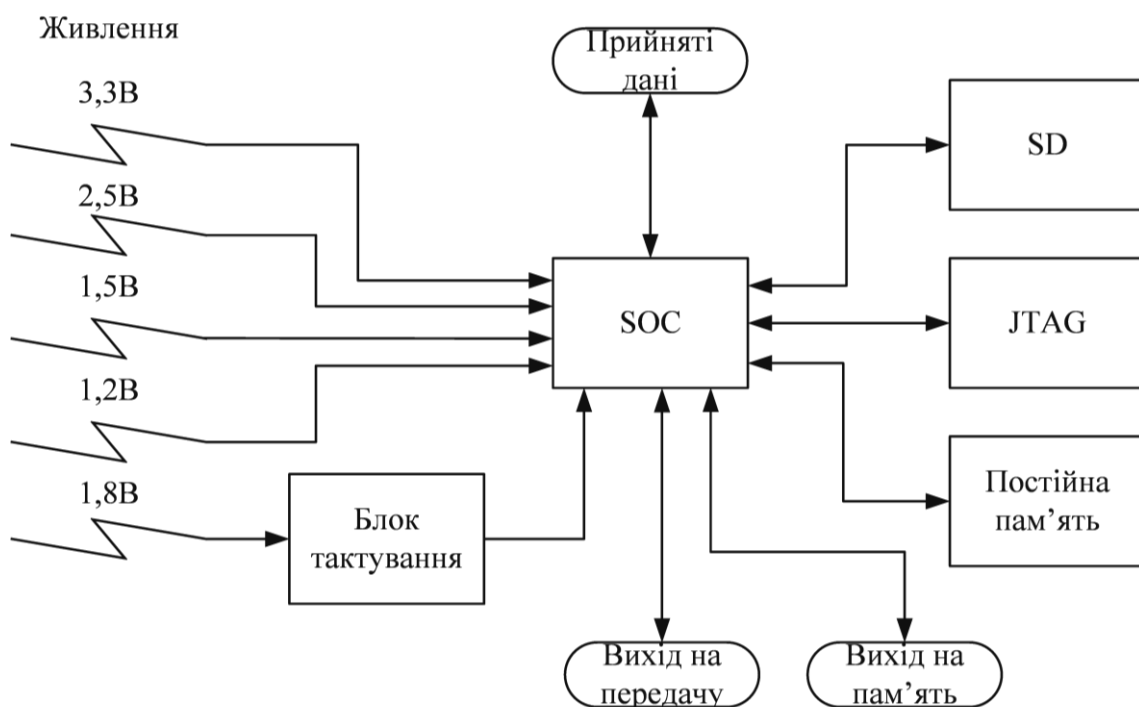


Рисунок 2.2 – Блок-схема блоку обробки даних

Розглянемо детально функції кожного блоку.

SOC Основний і єдиний блок, який обробляє інформацію на пристрої і виконує всі завдання, такі як:

- детектування сигналу;
- зберігання;
- обробка;
- розподілення;
- робота з налаштуваннями та інше.

Блок тактування. Призначений для створення сигналу тактування, який далі надходить у SOC.

Постійна пам'ять. Пам'ять, у якій зберігається прошивка для SOC, а саме для програмованої логічної матриці.

JTAG інтерфейс. Інтерфейс для налаштування і налагодження пристрою, також тільки через цей інтерфейс можна прошити постійну пам'ять.

SD – card інтерфейс. Містить на собі файли підкачки і файлову систему операційної системи при завантаженні та роботі, звідси програмується прилад. Саме ця пам'ять використовується операційною системою постійно.

2.1.2 Цифровий блок прийому даних

Цифровий прийом даних відповідає за прийом цифрового сигналу із зовнішнього пристрою чи схеми та захист блоку обробки даних, а також за налаштування входних логічних рівнів напруги. Це складний блок, який складається з простих: блок захисту від великого струму та напруги, блок керування логічними рівнями, блок керування опорним живленням. Кількість окремих повторювальних блоків (кожен окремий канал) – 8 штук. Блок-схема цифрового блоку прийому даних продемонстрована на (рисунок 2.3).

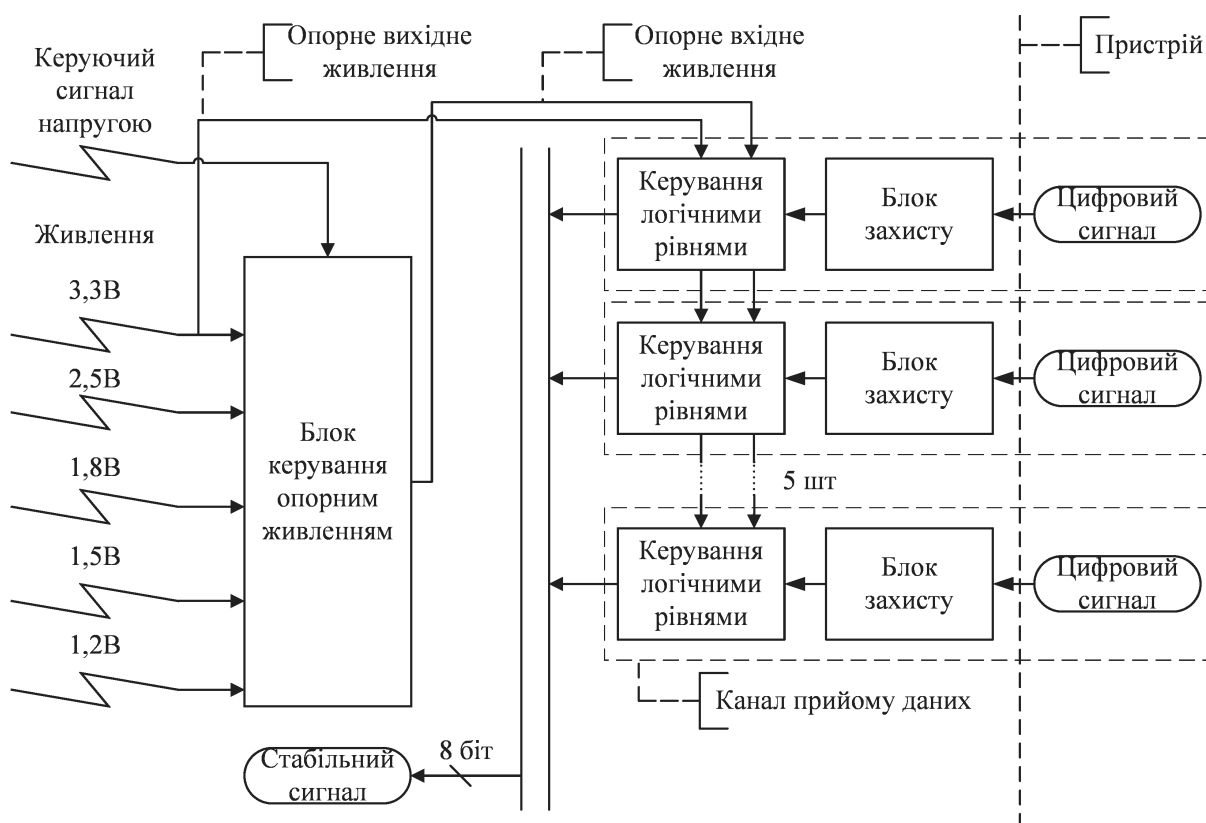


Рисунок 2.3 – Блок-схема цифрового блоку прийому даних

Блок керування опорним живленням – приймає на вхід керуючий сигнал від блоку обробки даних. Живлення приходить зі схем живлення. Є 5

варіантів напруги, такі як: 3,3В, 2,5В, 1,8В, 1,5В, 1,2В. Це стандартні і популярні рівні живлення.

Блок керування логічними рівнями. Після цього обрана напруга відправляється на блок керування логічними рівнями. Цей блок виконує перетворення сигналу з обраного логічного рівня на стандартний, з яким працює блок обробки даних, а саме 3,3В.

Блок захисту. Блок захисту відповідає за недопущення критичного струму чи напруги до блоку обробки інформації. Блок керування рівнями теж виконує завдання захисту процесора, якщо все ж таки напруга чи струм пройде через блок захисту, то наступний блок майже 100% захистить процесор.

2.1.3 Аналоговий блок прийому даних

Аналоговий прийом даних - це блок, який відповідає за аналогову частину. Він складається з декількох блоків, таких як: згладжуючий фільтр, блок захисту і АЦП. Призначення – зчитування аналогових даних і відправлення їх на блок обробки даних у цифровому послідовному виді. Блок-схема аналогового блоку прийому даних продемонстрована на (рисунок 2.4).

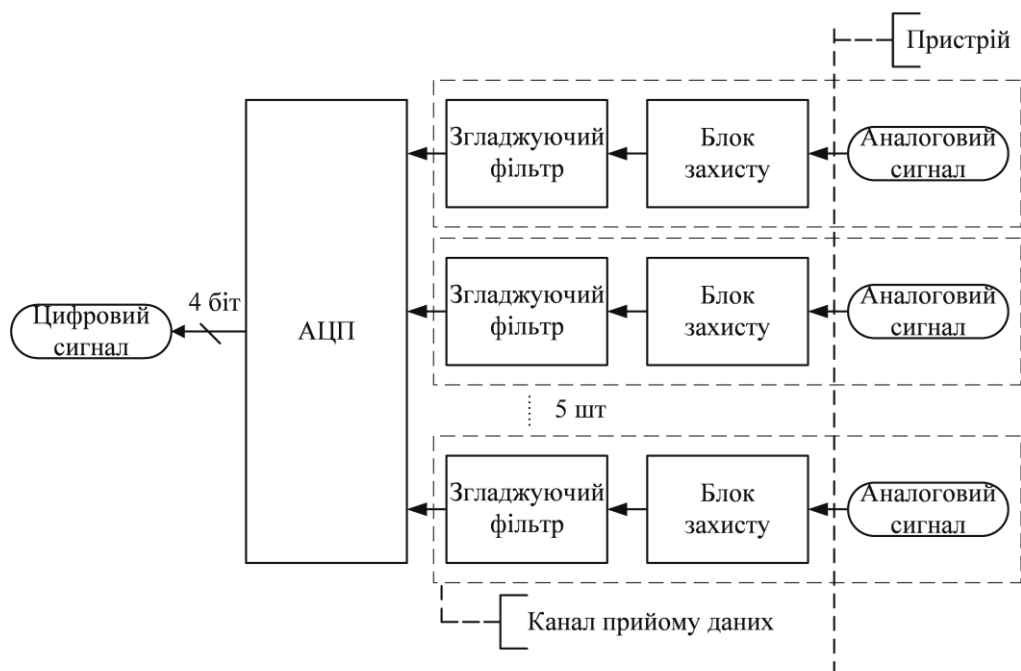


Рисунок 2.4 – Блок-схема аналогового блоку прийому даних

Блок захисту. Відповідає за захист по струму, що забезпечить захист для АЦП і зменшить вірогідність пошкодження портів. Це дуже необхідно, оскільки аналоговий сигнал надходить від користувача.

Згладжуючий фільтр. До АЦП сигнал надходить на аналоговий ФНЧ, який видаляє всі частотні складові спектра, що лежать вище частоти Найквіста (половини частоти дискретизації). Тобто цей фільтр необхідний для усунення ефекту накладання спектрів (алайзінга), і він називається антїалайзінговим фільтром.

АЦП. Відцифровує дані та надсилає на блок обробки даних, у пристрої використовується протокол SPI для передачі відцифрованого сигналу на процесор.

2.1.4 Оперативна пам'ять

Потрібна для функціонування операційної системи Linux на сопроцесорі.

2.1.5 Зовнішні інтерфейси

Wi-Fi. Пропоноване унікальне рішення на ринку для цього типу пристроїв. Для зручного і дистанційного з'єднання з приладом, наприклад, у складних умовах, коли немає змоги під'єднатися до приладу дротовим методом. Також це додає можливість під'єднати логічний аналізатор до планшета чи смартфона.

UART. Найповільніший варіант з'єднання з ПК, але при цьому є найуніверсальнішим, тому що USB - загально прийнятий протокол з'єднання.

Ethernet. Найшвидший протокол передачі даних, швидкість якого може досягати 1ГБ/с. Це дає змогу майже миттєво передавати отримані дані з пристрою. Також завдяки мережевим технологіям можна об'єднати логічні аналізатори в групи чи пасивно відстежувати сигнали й реагувати тільки на задані комбінації сигналу.

					ДК61.416123.001ПЗ	27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1.6 Датчик температури

Потрібен для відстеження зміни температури в пристрої і забезпечення захисту від перегріву. Оскільки це може дуже нашкодити приладу, можливий вихід з ладу логічного аналізатора через перегрів.

2.2 Схема живлення приладу

Живлення – це досить складна частина схеми. На плату заходить живлення від зовнішнього блоку живлення для уникнення проблем з нестачею струму для роботи пристрою. Для трасування та подальшої розробки пропонується наступна схема живлення пристрою (рисунок 2.5). Також є фізична кнопка перезавантаження пристрою.

Живлення складається з 6 опорних напруг: 5В; 3,3В; 2,5В; 1,8В; 1,2В.

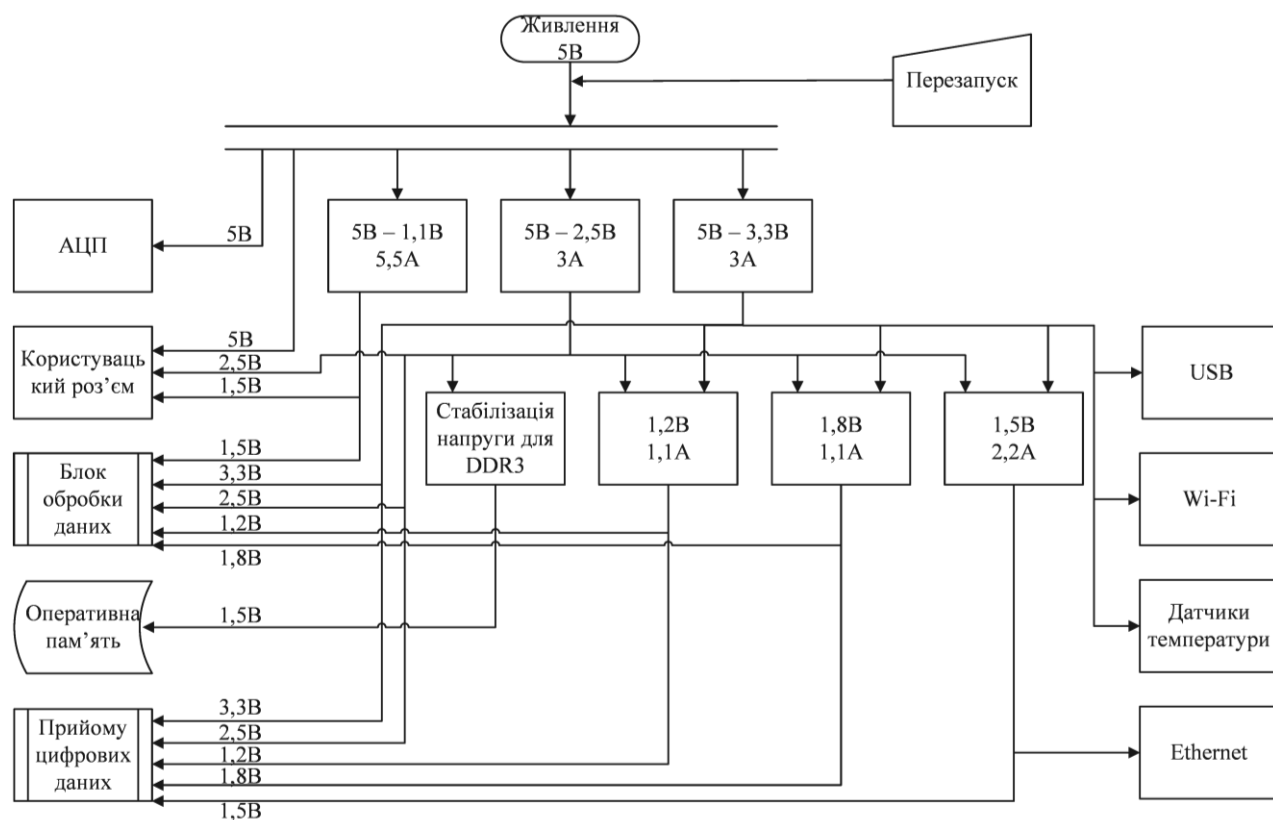


Рисунок 2.5 – Блок-схема живлення пристрою

Від цих напруг живиться вся схема, а саме: АЦП, виходи для користувача, блок обробки даних, оперативна пам'ять, блок прийому цифрових даних, USB, Wi-Fi, датчик температури, Ethernet.

2.3 Вибір та обґрунтування елементної бази

Для пошуку оптимального конструкторського рішення здійснюється вибір елементної бази для пристрою, що проєктується, із наступних міркувань:

- забезпечити необхідні електричні параметри із заданою точністю;
- відповідність характеристикам, заявленим у розділі розділ 1;
- коректна робота в заданих кліматичних умовах;
- орієнтація на масо-габаритні показники пристрою;
- надійність пристрою і заданий термін працездатності;
- цінові показники.

Вибір елементної бази проводиться на основі схеми електричної принципової з урахуванням викладених у ТЗ умов і вимог. Схема містить пасивні компоненти, цифрові й аналогові мікросхеми, мікроконтролер. Зважаючи на всі дані попередніх розділів, треба обрати компоненти для розробки прототипу пристрою.

2.3.1 Вибір системи на кристалі

У системі на кристалі (SOC) є декілька основних показників, такі як:

- кількість логічних блоків ПЛІС;
- кількість шин тактування ПЛІС;
- кількість пам'яті ПЛІС;
- кількість блоків логічних масивів;
- кількість портів;
- ціна;
- частота процесора.

Розглянемо декілька конкурентних рішень від Intel тому, що рішення від Xilinx на українському ринку зустрічаються рідше, що здешевить виробництво. Розглядаються тільки SOC чипи з різних серій таблиця 2.1.

Таблиця 2.1 – Вибір системи на кристалі

	5CSEMA6F31I7N [17]	10AS016E4F29E3SG [18]	5AGXMA5G4F35C5G [19]	10AS027E4F29E3SG [20]	5CEBA9F31C7N [21]
Кіл. блоків	166036	246040	190000	406480	301000
Кіл. такт.	16	32	32	32	16
Пам'ять	6,151 МБіт	9 Мбіт	11,8 Мбіт	15Мбіт	12,2 МБіт
Блок лог.	41509	61510	23750	101620	113560
Портів	288	288	544	360	480
Ціна ⁴⁾ , грн	7308,34	13185,35	20673,91	20327,42	8738,49
Част. проц.	925 МГц	1,5 ГГц	1,05 ГГц	1,5 ГГц	925 МГц

Далі нормуємо всі параметри з таблиця 2.1. Отримуємо таблиця 2.2, у ній використовується замість назв компонентів номери з попередньої таблиці.

Сірим позначені мікросхеми, які мають найліпші характеристики.

Коефіцієнти для вибору найліпшого з кристалів будуть такі:

- кількість логічних блоків ПЛІС – 0,1 (для реалізації пристрою не потрібна велика кількість логічних елементів);
- кількість шин тактування ПЛІС – 0,05 (для реалізації пристрою не потрібна велика кількість опорних тактових сигналів);

⁴ Ціни вказані на 6 травня 2020 року.

- кількість пам'яті ПЛІС – 0,05 (серед всіх обраних пам'яті достатньо для реалізації пристрою);
- кількість блоків логічних масивів – 0,05 (для реалізації пристрою не потрібна велика кількість логічних елементів);
- кількість портів – 0 (параметр не має впливу, оскільки мінімальної кількості виводів з обраних систем на кристалі буде достатньо);
- ціна – 0,45 (для створення конкурентного рішення цей параметр має майже найвпливовішу роль);
- частота процесора – 0,3 (для швидкої обробки сигналів дуже важливий параметр).

Таблиця 2.2 – Вибір системи на кристалі нормована

	1	2	3	4	5
Кіл. блоків	0,41	0,61	0,47	1,00	0,74
Кіл. такт.	0,50	0,75	1,00	1,00	0,50
Пам'ять	0,41	0,60	0,79	1,00	0,81
Блок лог.	0,41	0,61	0,23	1,00	0,11
Портів	0,53	0,53	1,00	0,66	0,88
Ціна	-0,35	-0,64	-1,00	-0,98	-0,42
Част. проц.	0,62	1,00	0,70	1,00	0,62

Після введення цих коефіцієнтів у таблицю 2.2 і підсумування результату для кожної системи на кристалі, маємо такі дані таблиця 2.3.

Таблиця 2.3 – Вибір системи на кристалі результат

Система на кристалі	Результат
5CSEMA6F31I7N	0,13
10AS016E4F29E3SG	0,17
5AGXMA5G4F35C5G	-0,09
10AS027E4F29E3SG	0,11
5CEBA9F31C7N	0,14

З таблиця 2.3 маємо, що найкращий елемент, це – 10AS016E4F29E3SG, але він має дуже велику ціну, що робить надалі розробку не рентабельною.

Беремо наступний, це 5CSEMA6F31I7N – він має прийнятну ціну і характеристики, яких буде достатньо для реалізації проєкту.

2.3.2 Вибір АЦП

Для того, щоб реалізувати живлення від 5В, введемо обмеження на максимальну вхідну напругу у 5В. Це погано впливає на універсальність пристрою, але зменшує кількість схем живлення і напругу живлення пристрою. Розглядаються АЦП тільки з одночасним зчитуванням даних.

У цифро-аналогових перетворювачів є ряд важливих для розробки пристрою параметрів:

- роздільна здатність;
- швидкість відцифровки;
- максимальна вхідна напруга;
- кількість каналів;
- відношення сигнал/шум;
- відношення сигнал/похибка зчитування;
- протокол вихідного цифрового сигналу.

З огляду на ТЗ, є ряд заданих параметрів: кількість каналів – 8, протокол вихідного сигналу – SPI.

Параметри обраних для порівняння АЦП наведені у таблиця 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняння АЦП

	AD7771	AD7606B	LTC2320 -14	LTC2358 -18	ADAS 3023
Розд. здат., біт	24	16	14	18	16
Швидкість, семплів	128000	800000	1500000	200000	500000
Мак. Напр., В	3,6	3,6	2,5	5	5,5
Сигнал/шум, дБ	95	89,5	81	96,4	91,5
INL in LSB, LSBs	1,5	1,16	1	1	1
Ціна, грн	227	490	362	700	430

У таблиця 2.4 рядки сигнал/шум і ціна з від’ємним знаком. А рядок INL in LSB повинен прагнути до одиниці. Формула для знаходження коефіцієнта порівняння INL in LSB (2.1).

$$K = 1 - |1 - X|, \quad (2.1)$$

де K – коефіцієнт, нормований;

X – початкове значення.

Коефіцієнти для розрахунку більш відповідного АЦП:

- роздільна здатність – 0,2;
- швидкість відцифровки – 0,2;
- максимальна вхідна напруга – 0,2;
- відношення сигнал/шум – 0,1;
- відношення сигнал/похибка зчитування – 0,1;
- ціна – 0,2.

Таблиця визначення найліпшого АЦП, наведена таблиця 2.5.

Таблиця 2.5 – Порівняння коефіцієнтів АЦП

АЦП	Коефіцієнт
AD7771	0.23
AD7606B	0.22
LTC2320-14	0.32
LTC2358-18	0.16
ADAS3023	0.28

Найліпший з цих АЦП по визначених коефіцієнтах буде LTC2320-14. Але в нього є великий недолік, про який написано в документації [22]. Для кожних двох входів є мультиплексор, що робить вибір, який з двох сигналів відцифровувати. Це не підходить для поставленої задачі.

Подібна проблема переслідує і ADAS3023, тому його теж не можна обрати.

А ось AD7606B підходить для поставленої задачі. Блок-схема цього АЦП наведена у додатку В. [23] Тому буде взято саме цей АЦП для пристрою.

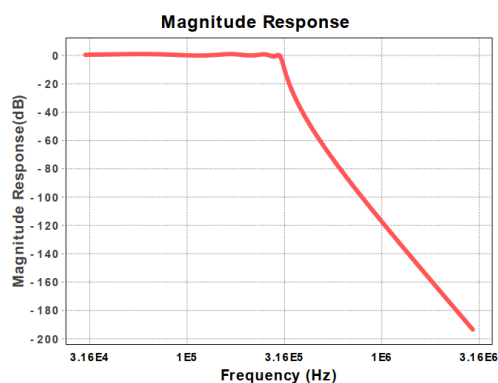
2.3.3 Розрахунок антialайзінгових фільтрів для АЦП

Для коректної відцифровки аналогового сигналу й уникнення накладання частот більших, ніж максимальна частота відцифровки, потрібен антialайзінговий фільтр. Вхідні дані - це максимальна частота відцифровки сигналу.

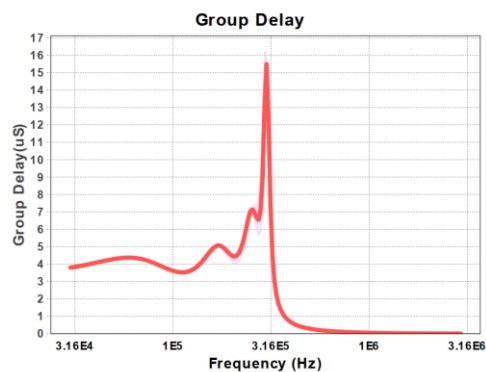
Антialайзінговий фільтр (anti-aliasing filter) – це фільтр низької частоти (ФНЧ), який застосовується на вході АЦП для підвищення якості відцифровки сигналу. Він потрібен для фільтрації частот, які більші за частоти дискретизації.

Розрахунок фільтра виконувався в додатку Filter Design Tool [24]. У цьому веб-додатку є можливість розрахунку будь-яких фільтрів, таких як: низькочастотних, високочастотних, смугових. Перш за все треба обрати

порядок фільтра і який саме він буде. Було обрано фільтр Чебишива, він має потрібні характеристики, але є недолік — характеристики не лінійні. Для зменшення впливу було взято досить високий порядок фільтра, а саме 8, це обумовлено тим, що це вимірювальний прилад і потрібно мати велику швидкість загасання і при цьому малий шум. Характеристики на (рисунок 2.6).



а)



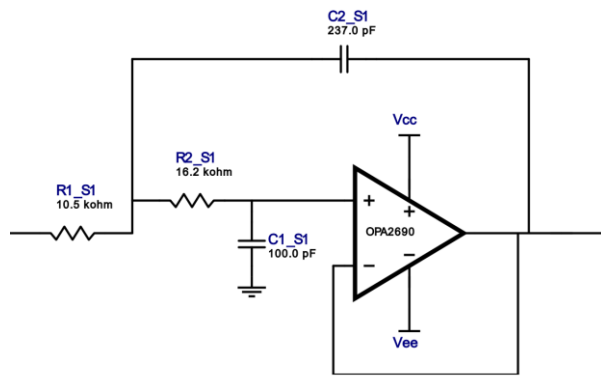
б)

Рисунок 2.6 – Характеристики фільтра а) АЧХ

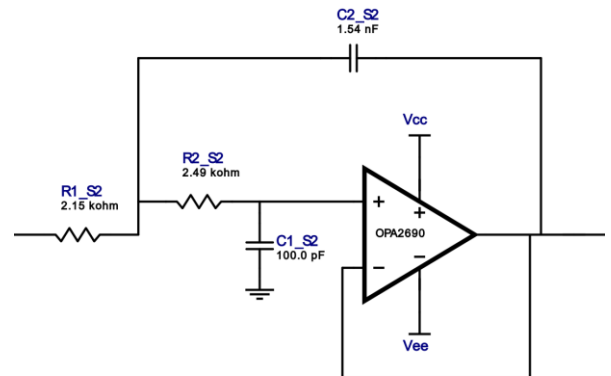
б) затримка від частоти

З цього рисунку видно, що коливання загасання досить малі. Схема самого фільтра наведена на (рисунок 2.7).

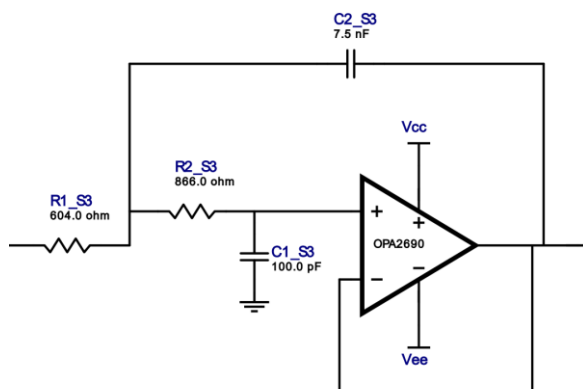
На цьому рисунку наведені 4 каскади фільтра. Вони з'єднані послідовно і повторюються для кожного каналу. Блоки дуже схожі, але мають різні параметри резисторів і конденсаторів, які повинні мати дуже точні характеристики й малі похибки для того, щоб фільтр працював правильно.



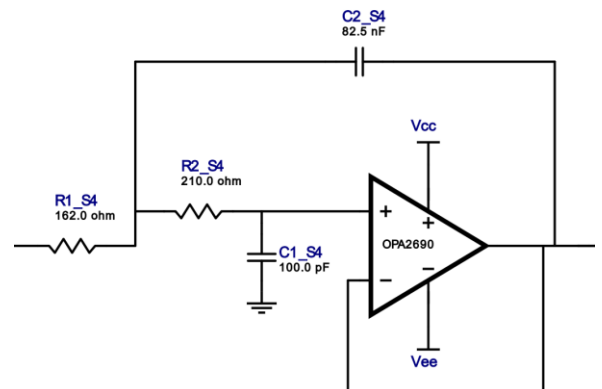
а)



б)



в)



д)

Рисунок 2.7 – Схема АЦП а) перша хвиля б) друга хвиля
в) третя хвиля д) четверта хвиля

Після розробки фільтра була створена його модель у програмі Tina-Ti [25] і протестована працездатність (рисунок 2.8).

Бачимо, що чим старший порядок, тим більш чистий сигнал маємо на виході. Тому для приладу використано саме цей фільтр на базі мікросхем (операційних підсилювачів) OPA2690 [26]. Однієї мікросхеми вистачає, щоб побудувати дві хвилі фільтра, тому для 1 каналу вистачить всього 2 мікросхеми, оскільки кристал містить 2 однакових операційних підсилювачі.

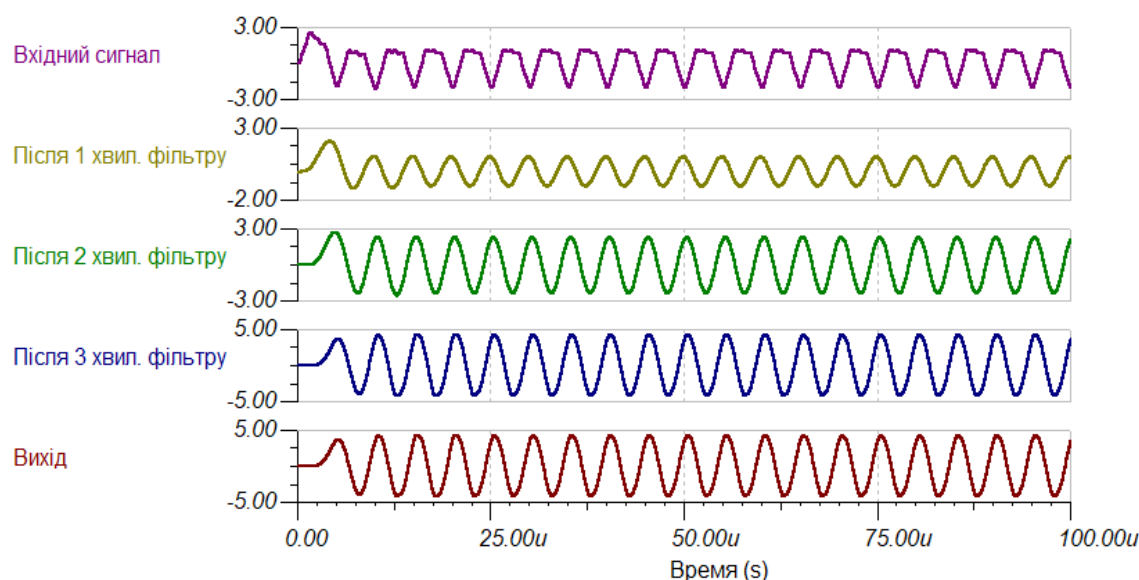


Рисунок 2.8 – Моделювання фільтру для АЦП

Висновок: розраховано антialайзінговий фільтр для максимальної частоти відцифровки обраного АЦП. Це фільтр Чебишева восьмого порядку. Його схема приведена на (Рисунок 2.12). Фільтр побудовано на операційних підсилювачах ОРА2690[26]. Напруга вхідного сигналу від -5 В до +5 В.

Операційні підсилювачі живяться від біполярного живлення. Тому треба розробити схему живлення ± 5 В.

2.3.4 Схема біполярного живлення

Біполярне живлення необхідно для живлення операційних підсилювачів, підсилювачів потужності та іншої техніки. Складність полягає в перетворенні звичайного живлення, яке має 5 В і землю у +5 В, -5 В і землю.

Для перетворення напруги було взято схему LT1111 від компанії Analog Devices [27]. Схема з документації наведена на (рисунок 2.9) [28].

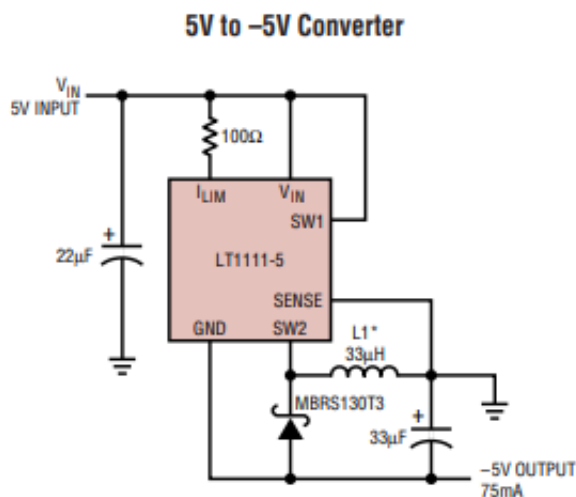


Рисунок 2.9 – Схема біполярного живлення

З приведенного зображення видно, що вихідний струм дорівнює 75 мА, цього достатньо для живлення 4 мікросхем ОРА2690. Згідно з документацією на елемент [29]. Після цього було зроблено симуляцію в програмі LTspice [30]. Отримані результати наведено на (рисунок 2.10).

З рисунку видно, що час встановлення стабільної напруги -5 В складає 1,4 мс. Це дуже мало для схеми, що розробляється.

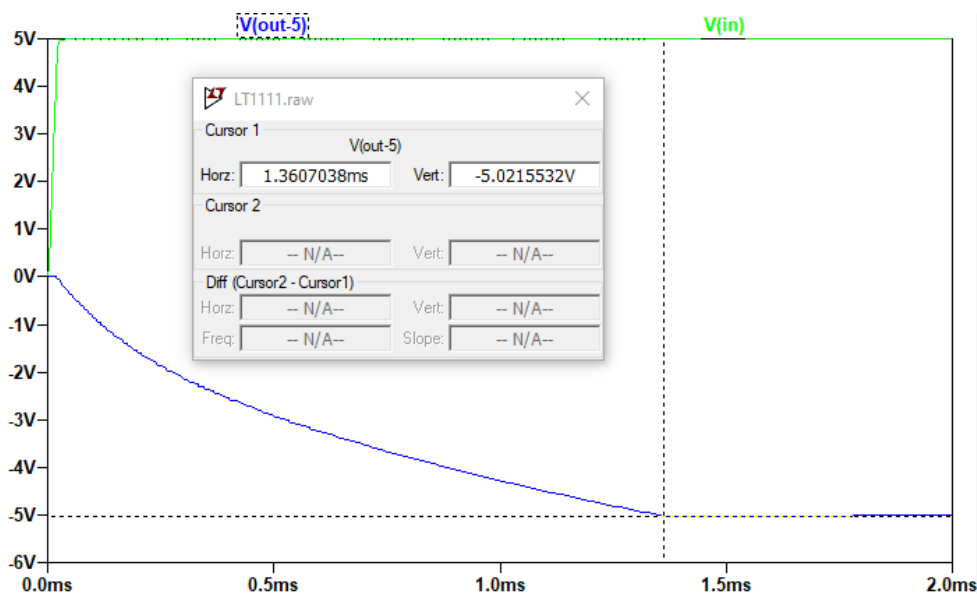


Рисунок 2.10 – Симуляція біполярного живлення

Висновок розділу

Було розроблено структурну схему пристрою, розглянуто кожен із блоків, такі як:

- обробка даних;
- цифровий блок;
- оперативна пам'ять;
- Wi-Fi;
- UART;
- Ethernet;
- датчик температури.

Після цього створено схему живлення пристрою, яка розглянута у відповідному розділі. Ця схема демонструє логіку розподілення і етапи перетворення напруг.

Було проведено вивчення ринку і проаналізовано деякі з елементів, які будуть використовуватися при виготовленні, а саме: SOC, АЦП. АЦП потребує на вході наявність антиалайзінгового фільтра. Розглянуто побудову фільтра, було обрано фільтр Чебишева 8 порядку. Його характеристики достатні для виконання поставленої задачі. Фільтр Чебишева побудовано на операційних підсилювачах, а вони потребують біполярне живлення. Тому було створено схему живлення для них і розраховано, що однієї схеми живлення вистачить на 8 операційних підсилювачів (чи чотири мікросхеми).

Розроблена схема електрична принципова. При її розробці використовувалися стандартні схеми включення з технічної документації розробника та відповідні рекомендації. Докладніше у додатку Н.

Для перевірки її працездатності, тестування та налагодження потрібно виготовити дослідний зразок, для якого було виконане конструкторське проектування, описане в розділах 3 та 4.

					ДК61.416123.001ПЗ	39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНІЧНИЙ

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

Розрахунки виконуються по методиці згідно з ГОСТ 23751-86.

3.1 Розрахунок мінімальної ширини друкованого провідника для ланцюгів живлення і землі по постійному струму.

При трасуванні на платі ланцюгів живлення і землі необхідно знати мінімальну дозволену ширину друкованого провідника. Вхідними даними для розрахунку є вживаний струм. Розрахунок мінімальної ширини друкованого провідника живлення і землі ведеться по формулі (3.1).

$$b_{min1} = \frac{I_{max}}{j_{допФ} * h_{Ф} + j_{допГ} * t_{провГ}}, \quad (3.1)$$

де I_{max} – максимально можливий струм у ланцюгу, А;

$j_{допФ}$ – допустима щільність струму у міді друкованого провідника, А/м²;

$h_{Ф}$ – товщина друкованого провідника, міді дорівнює 0,035 мм;

$j_{допГ}$ – допустима щільність струму у гальванічної міді друкованого провідника, А/м²;

$t_{провГ}$ – товщина друкованого провідника, гальванічної міді, мм.

Розрахунок максимального можливого струму у ланцюгу.

На платі основний елемент – SOC. Він і вживає найбільше струму. Для розрахунку його потужності і струму, згідно з документацією [31], треба використовувати спеціальний додаток [32] (це файл у програмі Excel, який розраховує дані за заданими характеристикам). До нього є інструкція по використанню [33]. Детальний розрахунок наведено у додатку Г.

Маємо загальний струм споживання SOC: $0,937 + 0,463 = 1,4$ (А).

Перелік інших мікросхем наведено у специфікації. Для них струм взято з документів і додано до таблиці з загальним розрахунком додаток Е. Для

					ДК61.416123.001ПЗ	40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахунку буде зручно використовувати 2,2 А замість 2,13 А. Дані взяті з запасом, це буде означати, що вірогідність коректної роботи пристрою буде більшою.

Допустиму щільність струму друкованого провідника взято з ГОСТу 23751 [34]. У ньому наведені числа для міді від 100 А/мм² до 250 А/мм², для гальванічної міді від 60 А/мм² до 100 А/мм².

Також було досліджено IPC-2221A [35], у ньому є рисунок, на якому зображено функцію залежності струму від квадратної міл⁵). Графік з IPC-2221A зображено у додатку Ж [35].

Товщина гальванічної міді друкованого провідника розраховується за формулою (3.2).

$$t_{\text{пров}} = h_{\text{ГМ}} + h_{\text{ХМ}}, \quad (3.2)$$

де: $h_{\text{ГМ}}$ – товщина гальванічно осадженої міді, мм;

$h_{\text{ХМ}}$ – товщина шару хімічно осадженої міді, мм.

Розрахунок товщини наведено у формулі (3.3).

$$t_{\text{пров}} = 0,055 + 0,0065 = 0,0615 \text{ (мм)} \quad (3.3)$$

Розрахунок мінімальної ширини провідника живлення для 5 В. (3.4).

$$b_{\text{min1}} = \frac{2.2}{100 * 0,035 + 60 * 0,0615} = 0,3 \text{ (мм)} \quad (3.4)$$

Бачимо, що за ГОСТом мінімальна ширина провідника при мінімальній щільності струму – 0,3 мм. При максимальній щільності струму – 0.15 мм.

Якщо рахувати за IPC-2221A додаток Ж, то отримаємо наступні дані. При температурі 10°C внутрішній провідник – 50 кв. міл, що дорівнює 0,032 мм². Як зазначено у документації, ці розрахунки ведуться тільки для товщини фольги, тому, щоб отримати ширину провідника, треба поділити визначену величину на 0,035 мм. Отримуємо 0,9 мм, ширину провідника на вході плати при

⁵ Міл – це одиниця виміру відстані у англійській системі мір. Вона дорівнює 1/1000 дюйма, чи 0,0254 мм.

температурі 10°C. Аналогічно розрахована ширина провідника для різних температур у таблиці 3.1. З таблиці видно ширину провідника, тобто, чим вища температура, тим менша можлива ширина друкованого провідника.

Таблиця 3.1 – Ширина провідників живлення у залежності від температури за IPC-2221A

Температура	Ширина зовнішнього провідника (мм)	Ширина внутрішнього провідника (мм)
10	0,92	2,4
20	0,65	1,66
30	0,46	1,11
45	0,37	0,92
60	0,31	
75	0,24	
100	0,18	

Залежність продемонстрована на (рисунок 3.1).

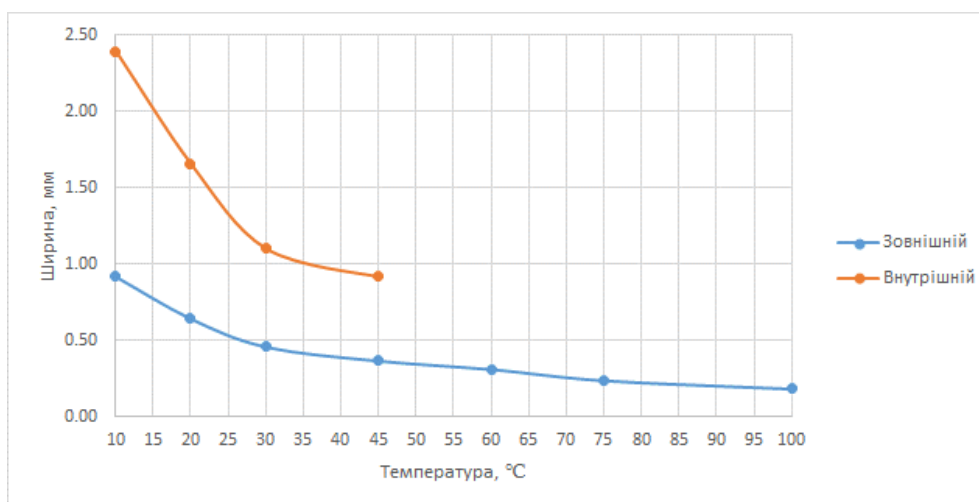


Рисунок 3.1 – Ширина провідників живлення у залежності від температури за IPC-2221A

Ширина внутрішнього провідника теж влаштовує вимоги стандарту, так як використовується заливка всього шару друкованої плати полігоном живлення відповідної напруги.

Аналогічно до попереднього розрахунку, розраховується локальне живлення. Змінним є тільки струм, тому він буде перерахований для кожної опорної напруги. Розрахунки для напруги: 3,3 В, 2,5 В, 1,8 В, 1,5 В, 1,2 В наведені у додатку И.

Висновок: були отримані такі дані ширини: 3,3 В – 0,03 мм; 2,5 В – 0,07 мм; 1,8 В – 0,01 мм; 1,5 В – 0,01 мм; 1,2 В – 0,07 мм.

3.2 Розрахунок мінімальної ширини провідника з урахуванням допустимого падіння на ньому напруги

Для проведення провідника на платі необхідно розрахувати його мінімальну ширину. Вхідними даними є напруга на провіднику, його довжина. Розрахунок ведеться за методикою, описаною в ГОСТі за формулою (3.5).

$$b_{minU} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot L_{пров}}{t_{пров} \cdot U_{доп}} \quad (3.5)$$

де: ρ – питомий опір мідного провіднику, виготовленого комбіновано

позитивним методом, $\rho = 0,0175 \left(\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right)$;

$L_{пров}$ – довжина провідника, мм;

$U_{доп}$ – допустиме падіння напруги на друкованому провіднику, В, розрахунок за формулою (3.6).

$$U_{доп} = 0,05 \cdot E_{п} \quad (3.6)$$

Провідник землі не буде розраховуватися, тому що на платі присутні 4 шари землі, це більш ніж достатньо для заземлення.

Самий довгий провідник на платі – провідник живлення – **3,3 В**, довжина 414 мм, допустиме падіння напруги – 0,165 В. Максимальний струм для всіх подальших розрахунків взято з попереднього додатка И. Розрахунок у (3.7).

					ДК61416123.001ПЗ	43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$b_{minU} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot L_{пров}}{t_{пров} \cdot U_{доп}} = \frac{0,0175 \cdot 0,177 \cdot 0,414}{0,097 \cdot 0,165} = 0,08 \text{ (мм)} \quad (3.7)$$

Висновок: цей розрахунок обмежує мін. ширину провідника до 0,08 мм.

Розглянемо провідник живлення – **2,5 В**, довжина 375 мм, допустиме падіння напруги – 0,125 В. Розрахунок у (3.8).

$$b_{minU} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot L_{пров}}{t_{пров} \cdot U_{доп}} = \frac{0,0175 \cdot 0,46 \cdot 0,375}{0,097 \cdot 0,125} = 0,24 \text{ (мм)} \quad (3.8)$$

Висновок: цей розрахунок обмежує мін. ширину провідника до 0,24 мм.

Розглянемо провідник живлення – **1,8 В**, довжина 188 мм, допустиме падіння напруги – 0,125 В. Розрахунок (3.9).

$$b_{minU} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot L_{пров}}{t_{пров} \cdot U_{доп}} = \frac{0,0175 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,188}{0,097 \cdot 0,125} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ (мм)} \quad (3.9)$$

Висновок: дуже мале число, тому, що малий струм споживання.

Розглянемо провідник живлення – **1,5 В.**, довжина 375 мм, допустиме падіння напруги – 0,075 В. Розрахунок (3.10).

$$b_{minU} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot L_{пров}}{t_{пров} \cdot U_{доп}} = \frac{0,0175 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,375}{0,097 \cdot 0,075} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ (мм)} \quad (3.10)$$

Висновок: мала ширина обумовлена малим струмом споживання.

Розглянемо провідник живлення – **1,2 В HPS**, довжина 270 мм, допустиме падіння напруги – 0,06 В. Розрахунок (3.11).

$$b_{minU} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot L_{пров}}{t_{пров} \cdot U_{доп}} = \frac{0,0175 \cdot 0,94 \cdot 0,28}{0,097 \cdot 0,06} = 0,8 \text{ (мм)} \quad (3.11)$$

Висновок: ця ширина обумовлена великим споживанням струму, при цьому не велика довжина провідника.

Розглянемо провідник живлення – **1,2 В всі крім HPS**, довжина 270 мм, допустиме падіння напруги – 0,06 В. Розрахунок (3.12).

$$b_{minU} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot L_{пров}}{t_{пров} \cdot U_{доп}} = \frac{0,0175 \cdot 0,5 \cdot 0,35}{0,097 \cdot 0,06} = 0,5 \text{ (мм)} \quad (3.12)$$

Висновок: модуль Ethernet споживає досить багато струму, тому він розташований поблизу з схемою живлення для зменшення відстані.

3.3 Номінальний діаметр контактного отвору

Цей параметр потрібен для розрахунку отвору, завдяки якому фіксуються роз'єми на друкованій платі. Вхідними параметрами є габаритні розміри контактів роз'єму. Розрахунок ведеться за методикою з ГОСТу. Номінальний діаметр контактного отвору визначається за (3.13)

$$d \geq d_{\text{ве}} + \Delta d_{\text{мо}} + r, \quad (3.13)$$

де: $d_{\text{ве}}$ – діаметр виводу елемента, для якого визначається діаметр МО, мм;

$\Delta d_{\text{мо}}$ – нижнє граничне відхилення від номінального діаметра МО, буде взято 0,1 мм;

$\Delta d_{\text{мо}}$ – різниця між мінімальним діаметром МО та максимальним діаметром контакту роз'єму, буде взято 0,15 мм.

За цією формулою проведені розрахунки для всіх компонентів, які мають контактні отвори. Детальні розрахунки наведені у додатку К.

Висновок: для роз'ємів розраховані такі діаметри контактних отворів:

2-406549-1 TE Connectivity AMP Connectors [36], на платі XS2: 0,72 мм, 1,28 мм, 3,28 мм.

MUSBB15134 Amphenol ICC (Commercial Products) [37], на платі XS4: 0,672 мм, 2,796 мм.

BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd [38], на платі XS5, XS6, XS7, XS8: 0,9 мм.

BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd [39], на платі XS9: 1,5 мм.

3.4 Діаметр контактної майданчика

Для електричного під'єднання елементів необхідно розрахувати діаметри контактних майданчиків. Вхідними даними для розрахунків є діаметри отворів роз'єму. Найменший номінальний діаметр D контактної майданчика розраховується за формулою (3.14).

					ДК61.416123.001ПЗ	45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$D = (d + \Delta d_{\text{в.о.}}) + 2 \cdot b + \Delta t_{\text{в.о.}} + 2 \cdot \Delta d_{\text{мт}} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{п.о.}}^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.14)$$

де: d – діаметр отвору;

$\Delta d_{\text{в.о.}}$ – більше граничне відхилення діаметру отвору, мм;

b – граничний поясок, мм;

$\Delta t_{\text{в.о.}}$ – більше граничне відхилення контактної площадки, мм;

$\Delta d_{\text{мт}}$ – значення підтравлення діелектрику в отворі дорівнює 0,03 мм для МПП, для ОПП, ДПП і ГПК – нулю, мм;

$\Delta t_{\text{п.о.}}$ – ніжне граничне відхилення діаметру контактної площадки, мм;

T_d – значення позиційного допуску розташування осей отворів дорівнює: 0,05 мм;

T_D – значення позиційного допуску розташування центрів контактний майданчиків, мм.

Дані у формулі (3.14) визначаються з таблиць додатка Е. Для пристрою, що розробляється, T_D використовується для внутрішніх шарів: 0,1 мм, а для зовнішніх 0,05 мм. Мінімальний граничний поясок для п'ятого класу дорівнює: 0,025 мм. Тепер є можливість провести розрахунки для кожного отвору, дані діаметрів отворів роз'ємів будуть використані із розділу 3.3.

Роз'єм 2-406549-1 TE Connectivity AMP Connectors, на платі XS2

Діаметр отвору роз'єму $d = 0,9$ мм. Розрахунок наведено у (3.15).

$$D = (1 + 0,1) + 2 \cdot 0,025 + 0,03 + 2 \cdot 0,03 + (0,05^2 + 0,05^2 + 0,03^2)^{\frac{1}{2}} = 1,31(\text{мм}). \quad (3.15)$$

Висновок: на платі використовується отвір з пояском, який дорівнює 1,4 мм, це більше ніж за розрахунками, що допустимо.

Роз'єм MUSBB15134 Amphenol ICC (Commercial Products), XS4

Діаметр контактного отвору $d = 0,8$ мм. Розрахунок наведено у (3.16)

$$D = (0,8 + 0,025) + 2 \cdot 0,025 + 0,03 + 2 \cdot 0,03 + (0,05^2 + 0,05^2 + 0,03^2)^{\frac{1}{2}} = 1,04(\text{мм}) \quad (3.16)$$

Висновок: на платі використовується отвір з пояском, який дорівнює 1,1 мм, це більше ніж за розрахунками, що допустимо.

Діаметр контактного отвору $d = 3,2$ мм. Розрахунок наведено у (3.17)

$$D = (3,2 + 0,1) + 2 \cdot 0,025 + 0,03 + 2 \cdot 0,03 + (0,05^2 + 0,05^2 + 0,03^2)^{\frac{1}{2}} = 3,51 \text{ (мм)} \quad (3.17)$$

Висновок: на платі використовується отвір з пояском, який дорівнює 4,0 мм, це більше ніж за розрахунками, що допустимо.

Роз'єм 0901303108 Molex, на платі XP1, XP2, XP3, XP4, XP5

Діаметр контактного отвору $d = 1,0$ мм. Розрахунок наведено у (3.18)

$$D = (1 + 0,1) + 2 \cdot 0,025 + 0,03 + 2 \cdot 0,03 + (0,05^2 + 0,05^2 + 0,03^2)^{\frac{1}{2}} = 1,31 \text{ (мм)} \quad (3.18)$$

Висновок: на платі використовується отвір з пояском, який дорівнює 1,5 мм, це більше ніж за розрахунками, допустимо.

Роз'єм BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd, на платі XS5, XS6, XS7, XS8

Діаметр контактного отвору $d = 2,2$ мм. Розрахунок наведено у (3.18)

$$D = (2,2 + 0,1) + 2 \cdot 0,025 + 0,03 + 2 \cdot 0,03 + (0,05^2 + 0,05^2 + 0,03^2)^{\frac{1}{2}} = 2,51 \text{ (мм)} \quad (3.18)$$

Висновок: на платі використовується отвір з пояском, який дорівнює 3,0 мм, це більше ніж за розрахунками, що допустимо.

Роз'єм BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd, на платі XS9

Діаметр контактного отвору $d = 1,5$ мм. Розрахунок наведено у (3.19)

$$D = (1,5 + 0,1) + 2 \cdot 0,025 + 0,03 + 2 \cdot 0,03 + (0,05^2 + 0,05^2 + 0,03^2)^{\frac{1}{2}} = 1,8 \text{ (мм)} \quad (3.19)$$

Висновок: на платі використовується отвір з пояском, який дорівнює 2,0 мм, це більше ніж за розрахунками, що допустимо.

					ДК61.416123.001ПЗ	47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5 Відстань між провідником та контактним майданчиком

Для проведення провідників на платі необхідно розрахувати відстань між провідником та контактним майданчиком, між двома сусідніми провідниками, між двома контактними майданчиками.

Мінімальна відстань між провідником та контактним майданчиком визначається за формулою (3.20) [40]

$$l_{\text{ПКМ}min} = L_0 - \left(\frac{D_{max}}{2} + \delta_{\text{КМ}} + \frac{b_{max}}{2} + \delta_{\text{СП}} \right), \quad (3.20)$$

де: L_0 – відстань між центрами отворів та друкованим провідником, що кратні кроку координатної сітки, найгірший випадок $L_0 = 1,25$ (мм);

D_{max} – максимальний діаметр контактного майданчика, мм;

b_{max} – максимальна ширина провідника, мм;

$\delta_{\text{КМ}}$ – похибка розташування центра КМ відносно вузла КС, 0,05 мм;

$\delta_{\text{СП}}$ – похибка, що враховує зміщення провідника, $\delta_{\text{СП}} = 0,05$ (мм).

Треба розрахувати мінімальну ширину провідника за (3.21) [40].

$$b_{min} = b_{\text{пр}}^r + 1,5 \cdot h_{\text{ф}} + 0,03, \quad (3.21)$$

де: $b_{\text{пр}}^r$ – мінімальна ширина провідника для обраного класу точності – у нашому випадку $b_{\text{пр}}^r = 0,1$ мм для п'ятого класу точності додаток М;

$h_{\text{ф}}$ – товщина друкованого провідника, міді дорівнює 0,035 мм.

Розрахунок наведено у формулі (3.22).

$$b_{min} = 0,1 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 0,18 \text{ (мм)} \quad (3.22)$$

Максимальна ширина провідника буде дорівнювати (3.23). [40]

$$b_{max} = b_{min} + 0,02 \quad (3.23)$$

Розрахунок наведено у формулі (3.24).

$$b_{max} = 0,18 + 0,02 = 0,2 \text{ (мм)} \quad (3.24)$$

Розрахунок мінімальної відстані між провідником і контактною площиною за формулою (3.25). [40]

$$l_{\text{ПКМ}min} = 1,25 - \left(\frac{2,2}{2} + 0,05 + \frac{0,18}{2} + 0,05 \right) = 0,04 \text{ (мм)} \quad (3.25)$$

Висновок: на платі використано мінімальну відстань 0,1 мм.

Мінімальна відстань між двома сусідніми провідниками розраховується за формулою (3.26) [40].

$$l_{ппmin} = L_0 - (b_{max} + 2 \cdot \delta_{сп}) \quad (3.26)$$

Розрахуємо за наведеною формулою (3.27).

$$l_{ппmin} = 0,25 - (0,2 + 2 \cdot 0,05) = 1,15 \text{ (мм)}. \quad (3.27)$$

Мінімальна відстань між двома контактними майданчиками розраховується за формулою (3.29) [40].

$$l_{min \text{ КМ}} = L_0 - (D_{max} + 2 \cdot \delta_{КМ}) \quad (3.29)$$

де: L_0 – відстань між центрами сусідніх КМ, $L_0 = 2,5$ (мм).

$$l_{min \text{ КМ}} = 2,5 - (2,2 + 2 \cdot 0,05) = 0,2 \text{ (мм)}$$

Висновок: отримане значення задовольняє 5-ий клас точності. – як бачимо, між двома КМ не можна провести друкований провідник 5-го класу точності друкованого монтажу. Отже, треба обирати 5-ий клас точності.

Висновок розділу

В даному розділі були виконані конструкторсько-технологічні розрахунки, які необхідні для виконання розміщення елементів на друкованій платі та її трасування. В ході розрахунків було визначено, що необхідно обрати 5 клас точності для виконання друкованої плати.

Були проведені розрахунки мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму для ланцюгів живлення для всіх опорних напруг та розрахована мінімальна ширина провідника з урахуванням допустимого падіння напруги. Визначені мінімальні значення: 3,3 В – 0,03 мм; 2,5 В – 0,07 мм; 1,8 В – 0,01 мм; 1,5 В – 0,01 мм; 1,2 В – 0,07 мм.

Проведені розрахунки достатнього діаметру всіх контактних отворів та діаметрів контактних майданчиків для них. Вони становлять:

					ДК61.416123.001ПЗ	49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 2-406549-1 TE Connectivity AMP Connectors (XS2): діаметр КО – 0,72 мм; діаметр КМ – 1,31 мм;
- MUSBB15134 Amphenol ICC (Commercial Products) (XS4): діаметр КО – 0,672 мм, 2,796 мм; діаметр КМ – 1,04 мм, 3,51 мм;
- BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd (XS5, XS6, XS7, XS8): діаметр КО – 0,9 мм; діаметр КМ – 1,31 мм;
- BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd (XS9): діаметр КО – 1,5 мм, діаметр КМ – 1,8 мм.

Визначена мінімальна відстань між провідником та контактним майданчиком, що дорівнює 0,04 мм.

					ДК61.416123.001ПЗ	50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 ПРОЄКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА

Розробка друкованої плати оптимальна й необхідна тільки за умов: розробки приладу для серійного виробництва чи в умовах, коли потрібно забезпечити специфічні характеристики (розмір, захист від вологи чи пилу, характеристики міцності чи інші).

Для реалізації проєкту критичними є:

- можливість у подальшому запуску серійного виробництва;
- розміри плати для створення унікального корпусу для приладу.

У цьому розділі буде розглянуто розробку друкованої плати приладу та вибір матеріалу.

4.1 Вибір типу та матеріалу друкованої плати

Друкована плата – пластина, виготовлена з діелектрика (склотекстоліт, текстоліт, гетинакс, ситал тощо), на якій або/і всередині якої сформований хоча б один шар з провідними доріжками. На друковану плату монтуються електронні компоненти, які з'єднуються своїми виводами з елементами провідного рисунка паянням, або, значно рідше, зварюванням, у результаті чого складається електронний модуль – змонтована друкована плата [41].

Друковані плати бувають: односторонні (одношарові), двосторонні (двошарові), багатошарові.

4.1.1 Матеріал друкованої плати

Згідно технічному завданню і схемі електричній принципівій було прийняте рішення виготовляти 14 шарову друковану плату. Таке рішення було прийнято за таких умов:

- схема пристрою має багато схем живлення, живлення повинно проходити якомога далі від сигнальних шарів;

- на схемі присутня оперативна пам'ять DDR3, що означає багато сигнальних провідників і сигналів тактування;
- на схемі присутня аналогова частина (АЦП), що вимагає окремої частини на платі для захисту від завад;
- також присутня частина з бездротовим модулем, який містить антену, вона повинна бути далі від диференційних сигнальних провідників.

При виготовленні багат шарової плати потрібно розділяти кожні 2 інформаційних шари земляним шаром для зменшення ємності й створення більш завадостійкої схеми. Також треба послідовно змінювати напрям провідників на шарах. Тобто один шар з поздовжніми провідниками, а інший з поперечними.

Для даного приладу буде використано матеріал для основи друкованої плати FR4, він має такі характеристики:

- максимальна робоча температура 150 °С;
- пробивна напруга 40 кВ;
- тангенс кута діелектричних втрат від 50 Гц до 0 Гц;
- тангенс кута діелектричних втрат від 1 МГц до 0,04 МГц;
- діелектрична проникність від 50 Гц до 5,5 Гц;
- діелектрична проникність від 1 МГц до 5,5 МГц;
- щільність від 1,7 г/см³ до 1,9 г/см³;
- міцність на прогин 340 МПа;
- стійкість до розплавлення припою не менше 80 с.

Товщина друкованої плати обрана 2 мм. Цього достатньо для виконання всіх умов. Товщина кожного шару діелектрика – 0,11 мм, а металізації – 0,036 мм.

4.1.2 Шари друкованої плати

Розташування шарів наведено у додатку Н і таблиця 4.1, кожний стовпчик відповідає зазначеному в шапці призначенню.

					ДК61.416123.001ПЗ	52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1 – Призначення шарів друкованої плати

Сигнальні шари	Шари живлення	Земляні шари
1 (верхній шар)	3 (напруги 3,3 В і 1,5 В)	2
4	12 (всі напруги)	6
5		9
7		13
8		
10		
11		
14 (нижній шар)		

4.1.3 Міжшарові з'єднання

На платі буде декілька видів з'єднань: 1-14; 1-4; 1-11; 8-10; 5-7; 1-8; 7-14; 7-8; 7-11; 4-8; 1-12; 3-14; 12-14; 1-3; 1-2; 4-5; 1-5; 10-11; 5-10; 13-14; 4-11.

Саме цим обумовлений вибір технологічного процесу виготовлення друкованої плати в цьому розділі. Це збільшить вартість друкованої плати, але без цього неможливо зробити її трасування.

4.2 Вибір класу точності друкованої плати

Клас точності виготовлення друкованої плати залежить від технологічних параметрів і визначає основні параметри її елементів. У першу чергу це відноситься до мінімального зазору між елементами, розміру отворів та мінімальної ширини провідників.

ГОСТ 23571-86 передбачає п'ять класів точності ДП. При конструкторсько-технологічному розрахунку необхідно використовувати

граничні значення елементів друкованого монтажу з урахуванням похибки їх виконання. Необхідні граничні значення елементів друкованого монтажу і допустимі похибки наведені в додатку М.

Для даного завдання обрано 5 клас точності, оскільки мінімальні вимоги для трасування SOC, яка має UBGA корпус, це 5 клас точності. Складність трасування DDR3 пам'яті теж вимагає 5 клас точності.

На підставі конструкторських розрахунків у розділі 3 обрані такі параметри: 0,1 мм – мінімальна ширина провідника. Діаметр найменшого отвору – 0,15 мм. При товщині плати 2 мм, відношення мінімального діаметру металевого отвору до товщини плати складає 0,075 мм. Товщина гарантованого пояса 0,1 мм, що дорівнює мінімальній ширині провідника 5-ого класу точності. А на виробництві, на якому заплановано виконання замовлення (PCBWay) [42], мінімальний розмір провідника – 3/3 міл, що при переведенні на міліметри дорівнює 0,0762 мм. Тим самим, обраний провідник у 1,3 рази більший, ніж мінімально допустимий.

При трасуванні друкованої плати, по можливості, використовується більша ширина, ніж 0,1 мм. Це рішення обумовлене зниженням опору провідника й зменшенням можливості його пошкодження. Також для провідників живлення і землі використовуються набагато ширші провідники там, де це можливо, розміри досягають до 1,5 мм. Для живлення виділені окремі шари, на яких залиті великі площі для зменшення опору. Те саме зроблено і для шарів землі, що у свою чергу зменшує максимальну відстань, яку проходить струм і опір. Також шари землі зменшують завади, які створюють провідники живлення та інформаційні.

4.3 Вибір методу виготовлення друкованої плати

Для виготовлення друкованої плати обрано комбінований метод пошарового нарощування та наскрізних отворів тому, що плата має безліч

					ДК61.416123.001ПЗ	54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різних отворів, які мають різну глибину. Метод полягає в послідовному нанесенні ізоляції і друкованих провідників. Міжшарові з'єднання можуть проходити по всій глибині та з'єднувати будь-які внутрішні шари між собою. Як ізоляційний шар використовують ізоляційний лак або епоксидну смолу. Метод має велику надійність і дозволяє отримати високу щільність монтажу. Кількість шарів може бути більше шести. Недоліком цього методу є велика трудомісткість, пов'язана з необхідністю суворо дотримуватися послідовності операцій [43]. Детальна інформація про технологічний процес виготовлення друкованої плати наведена у додатку П.

4.4 Розміщення компонентів та трасування друкованої плати

Розміщення компонентів здійснюється за їх функціональним призначенням. Тобто, це окремі блоки, які зображені на (рисунок 4.1).

На зображенні вказані такі блоки:

- а) силова частина плати, яка відповідає за живлення й перетворення напруги;
- б) аналогова частина, прийняття сигналів із зовнішньої середовища;
- в) цифрова частина, прийом сигналів від зовнішніх джерел для аналізу;
- г) інтерфейси, всі дротові інтерфейси, відокремлення їх дозволяє зробити зручний менеджмент провідників і зручне користування пристроєм;
- д) частина з бездротовими з'єднаннями допомагає забезпечити безперебійну роботу і врятувати схему від електричних наводок;
- е) обробка даних, це SOC, оперативна пам'ять і її живлення.

Процесор розміщено в центрі печатної плати, оскільки в нього приблизно однакова зв'язність з основними елементами. Особливі труднощі виникають

при трасуванні оперативної пам'яті на платі. Треба дотримуватися декількох норм:

- однакова довжина провідників;
- розміщувати диференційну пару тактового сигналу на одному шарі разом з інформаційними сигналами цієї групи;
- розміщувати поблизу від процесора для зменшення довжини провідників та зменшення високочастотних завад.

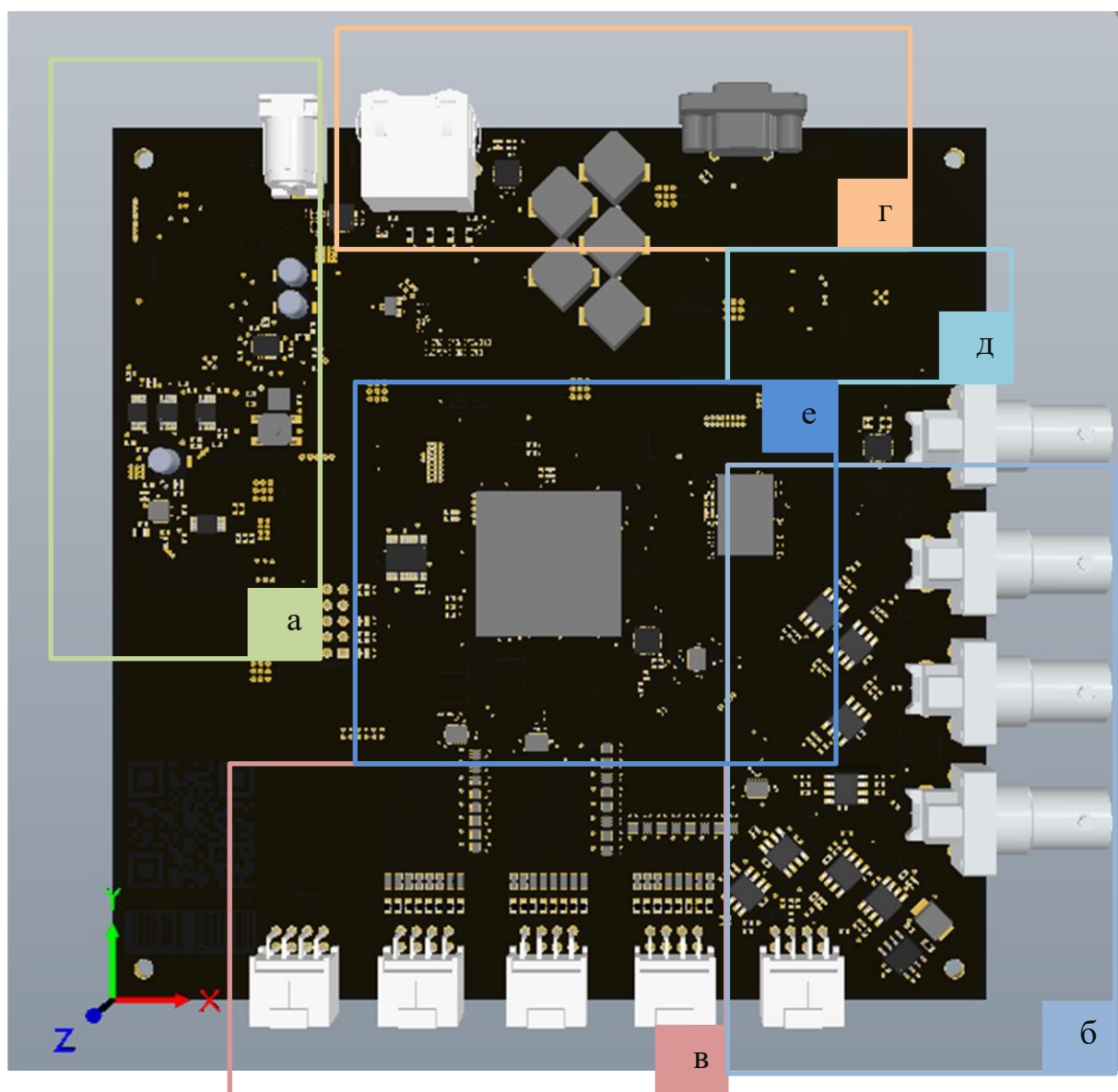


Рисунок 4.1 – Розміщення компонентів на друкованій платі

4.5 Проектування друкованої плати

Проектування плати здійснювалося в середовищі Altium Designer [44] – це система, що дозволяє реалізовувати проекти електронних засобів на рівні схеми або програмного коду з наступною передачею інформації проектувальнику ПЛІС або друкованої плати.

Відмінною особливістю програми є проектна структура і наскрізна цілісність ведення розробки на різних рівнях проектування. При проектуванні друкованої плати було виконано п'ять окремих задач, які розглядаються нижче.

Створення проекту.

Для роботи треба створити проект у програмі, у якому є всі необхідні файли і параметри. Будуть використані: PCB Project; Інтегрована бібліотека і Проект сценарію.

Створення бібліотеки компонентів

Цей етап включає в себе вивчення документації на кожен компонент і пошук посадкових майданчиків для кожного елемента в його документації. Також для деяких компонентів треба обрати тип корпусу. Для пристрою – логічного аналізатора було обрано такі типи корпусів:

- для мікросхем: BGA, PLCC, TQFP, SSOP, PSOP;
- для резисторів, конденсаторів, дроселів і котушок – SMD.

Після цього було створено кожен компонент у відповідності з УГО.

Створення посадкових місць і 3D моделей для компонентів

Цей етап доповнює попередній. У ньому створюється 3D модель кожного компонента в спеціалізованій програмі, наприклад SolidWorks [45].

Після імпорту моделі в Altium Designer треба створити посадковий майданчик на верхньому шарі (Top Layer), контур елемента на другому шарі, а модель – на четвертому шарі.

Створення схеми електричної принципової

Схема електрична принципова – набір окремих елементів (які відповідають УГО), вони з'єднуються провідниками (лініями). У САПР Altium Designer є можливість з'єднання провідників з однаковими назвами. Це допомагає зручно працювати з багатьма аркушами. Також зручно задавати саме зараз диференційні пари і класи для провідників. Завдяки класам задаються окремі правила для провідників. Приклад роботи на (рисунок 4.2).

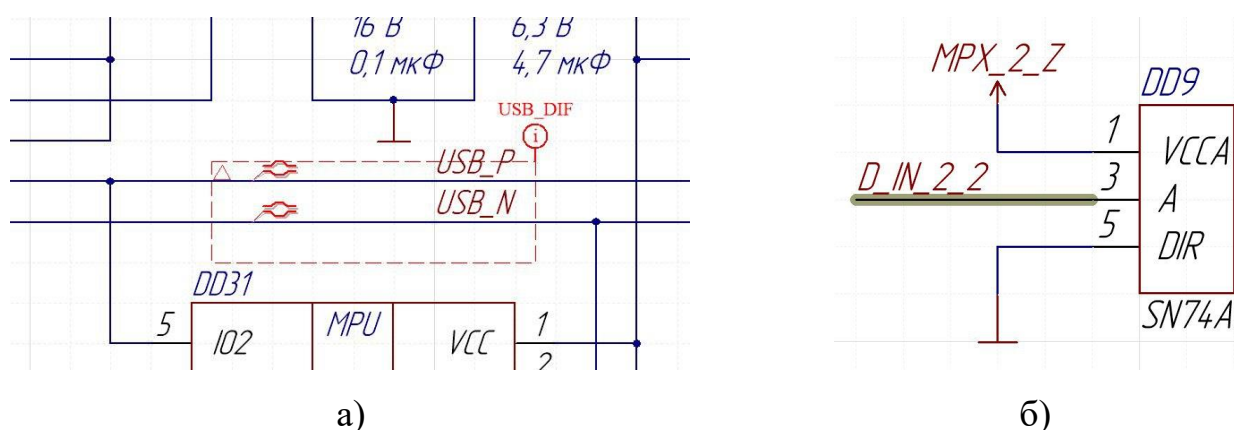


Рисунок 4.2 – Розміщення компонентів на друкованій платі

а) приклад використання класу і позначення диференційної пари документ ДК61.411614.001ЭЗ сторінка 7

б) приклад використання посилань (на зображені провідник *MPX_2_Z*, *D_IN_2_2* і GND) документ ДК61.411614.001ЭЗ сторінка 5

Трасування друкованої плати

Спочатку треба створити новий файл з самою друкованою платою і зробити імпорт з креслення принципового. Потім – визначитися з формою і габаритами друкованої плати. Для логічного аналізатора обрана квадратна плата зі скошеними кутами. Контур друкованої плати знаходиться на 1 шарі. Потім треба розташувати компоненти згідно з розділом 4.4.

Після чого – трасування. Трасування друкованих плат — один з етапів проектування радіоелектронної апаратури, що полягає в покроковому проектуванні структури провідників друкованої плати вручну або з

використанням однієї з САПР друкованих плат. Найскладніше – це диференційні пари і оперативна пам'ять тому, що в ній є багато правил і труднощів трасування.

На платі багато отворів, які дублюють один одного, це потрібно для зменшення опору перехідних отворів. Площа контакту збільшується. Також є окремо розташовані 9 отворів, біля яких вказано знак землі за стандартами ISO. Це зроблено для зменшення максимальної відстані, яку проходить струм. Також це добре впливає на зменшення шумів на шарах землі. Земляні полігони зроблені на всіх шарах, крім шарів живлення. Детально у додатку Р.

Висновок розділу

У розділі були розглянуті всі етапи створення друкованої плати.

Для виготовлення основи друкованої плати було обрано матеріал FR4. Це розповсюджений матеріал для виготовлення друкованих плат, його технічні характеристики задовольняють вимогам та роблять доцільним використання.

Для даного завдання обрано 5 клас точності друкованої плати, оскільки мінімальні вимоги для трасування SOC, яка має UBGA корпус, це 5 клас точності. Складність трасування DDR3 пам'яті теж вимагає 5 клас точності.

Згідно технічному завданню і схемі електричній принциповій було прийнято рішення виготовляти 14 шарову друковану плату. Для її виготовлення було обрано комбінований метод пошарового нарощування та наскрізних отворів тому, що він є оптимальним у даному випадку.

Розміщення компонентів на платі проводилося за функціональними ознаками, оскільки всі інші не будуть працювати для плати такої складності. Процесор розміщено в центрі печатної плати, оскільки в нього приблизно однакова зв'язність з основними елементами. Оперативну пам'ять розміщено біля процесора для зменшення довжини провідників та високочастотних завад. Було проведене трасування друкованої плати в САПР Altium Designer вручну.

					ДК61.416123.001ПЗ	59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ КОНСТРУКТОРСЬКО -ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ

У цьому розділі будуть використані буквені позначення згідно ГОСТ 23751-86.

5.1 Електричний розрахунок друкованої плати

5.1.1 Падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику

Мета – визначення працездатності мікросхеми на кінці провідника. Вхідні дані: максимальний струм, довжина провідника. Визначається за формулою (5.1) [40].

$$U_{\text{пад}} = \frac{\rho \cdot I_{\text{max}} \cdot l_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}} \cdot t_{\text{пр}}}, \quad (5.1)$$

де: ρ – питомий об’ємний опір для методу шарового нарощування і дорівнює

$$\rho = 0,0175 \left(\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right);$$

$l_{\text{пр}}$ – максимальна довжина друкованого провідника, м;

$t_{\text{пр}}$ – товщина провідника, мм;

I_{max} – струм провідника.

Для розрахунку взято провідник живлення 3,3 В, довжиною 414 мм. А струм споживання 0,177 А. Розрахунок наведено у (5.2).

$$U_{\text{пад}} = \frac{0,0175 \cdot 0,177 \cdot 0,414}{0,2 \cdot 0,097} = 0,07 \text{ (В)} \quad (5.2)$$

Висновок: максимально допустиме падіння напруги не повинно перевищувати 5% (165 мВ для 3,3 В). Тобто довжина провідника допустима.

					ДК61.416123.001ПЗ	60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.1.2 Потужність втрат

Мета – розрахувати втрати друкованої плати. Вхідні дані: напруга живлення, ємність друкованої плати.

Друкована плата складається з 14-ох шарів. Ємність виникає між кожними з двох шарів. Тому треба розрахувати ємність для кожної пари шарів. Потужність втрат розраховується за формулою (5.3) [40].

$$P_{\text{пот}} = 2\pi f \cdot C \cdot U_n^2 \cdot \tan \sigma, \quad (5.3)$$

де: $f = 1$ Гц – тому, що розрахунок ведеться на постійному струмі;

$\tan \sigma$ – тангенс кута діелектричних втрат для матеріалу друкованої плати, при 1 ГГц дорівнює 0,016; [46]

C – ємність друкованої плати, Ф;

U_n – напруга живлення, дорівнює 5В, тому, що решта напруги живлення менша за значенням, В.

Ємність шару розраховується за формулою (5.4)

$$C = \frac{0,009 \cdot \varepsilon \cdot S_m}{h}, \quad (5.4)$$

де: ε – діелектрична проникність матеріалу плати і дорівнює 4,3 Ф/м при 1 ГГц для FR4 [46];

S_m – площа металізації шару, мм²;

h – товщина діелектрику між шарами, мм.

Ємність між шаром 1 і шаром 2.

Площа металізації згідно з гербер-файлом друкованої плати шару 1 дорівнює: 16774,16 мм², а шару 2 – 18166,36 мм². Товщина друкованої плати між шарами однакова і дорівнює 0,11 мм. Розрахунок наведено у (5.5).

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (17140,12 + 18166,36)}{0,11} = 12421,46 \text{ (нФ)} \quad (5.5)$$

Розрахунки для кожної пари шарів друкованої плати у додатку С.

Загальна ємність плати розраховується за формулою (5.6).

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{1-2}} + \frac{1}{C_{2-3}} + \frac{1}{C_{3-4}} + \frac{1}{C_{4-5}} + \dots \quad (5.6)$$

Далі розрахунок, проведений за цією формулою, наведено у (5.7).

$$C = (80505814,25 + 78636224,61 + 79898992,48 + 80378164,26 + 78884735,86 + 78458263,85 + 79268847,24 + 78561752,13 + 78989239,71 + 80384895,74 + 80456827,25 + 79027467,02 + 79912455,96)^{-1} = \frac{1}{1033 \cdot 10^{+9}} = 9,67 \cdot 10^{-10} \quad (5.7)$$

Тобто загальна ємність плати дорівнює 967 пФ.

Потужність втрат визначена за формулою (5.3), результат у (5.8).

$$P_{\text{пот}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 9,67 \cdot 10^{-10} \cdot 3,3^2 \cdot 0,016 = 1,058 \cdot 10^{-9} \text{ (Вт)} \quad (5.8)$$

Висновок: результуюча потужність втрат дорівнює 1,058 нВт, це мало.

5.1.3 Ємність між двома сусідніми провідниками, які розташовуються на одній стороні ДП та мають однакову ширину

Мета – дослідити завади, що виникають. Для розрахунку було обрано провідники інформаційного провідника датчика температури, а саме провідник шини I²C (SDA і SCL), тому, що вони найдовші паралельні провідники на платі. Розрахунок буде виконано за формулою (5.9) [40].

$$C = 0,12 \cdot \varepsilon \cdot l_{\text{пр}} \left(\log_{10} \frac{2S}{b_{\text{пр}} + t_{\text{пр}}} \right)^{-1} \quad (5.9)$$

де: S – відстань між двома паралельними провідниками, $S = 0,65$ (мм);

$b_{\text{пр}}$ – ширина друкованого провідника, $b_{\text{пр}} = 0,2$ (мм);

$t_{\text{пр}}$ – товщина друкованого провідника, $t_{\text{пр}} = 0,035$ (мм);

$l_{\text{пр}}$ – довжина взаємного перекриття двох паралельних провідників, $l_{\text{пр}} = 221$ (мм).

По визначених даних було виконано розрахунок (5.10).

$$C = 0,12 \cdot 4,3 \cdot 0,035 \left(\log_{10} \frac{2 \cdot 0,65}{0,1 + 0,035} \right)^{-1} = 153,5 \text{ (пФ)} \quad (5.10)$$

Висновок: маємо, що ємність між самими довгими сусідніми провідника на платі дорівнює 153,5 пФ, що мало.

5.1.4 Взаємна індуктивність між двох паралельних провідників однакової довжини

Мета – дослідити завади, що виникають. Для розрахунку буде обрано ті ж самі провідники. А визначається за формулою (5.11) [40].

$$M = 0,02 \left(l_{\text{пр}} \cdot \lg \frac{\sqrt{(l_{\text{пр}}^2 + l_o^2)} + l_{\text{пр}}}{L_o} - \sqrt{(l_{\text{пр}}^2 + l_o^2)} + L_o \right) \quad (5.11)$$

де: $l_{\text{пр}}$ – довжина перекриття паралельних провідників, $l_{\text{пр}} = 22,1(\text{см})$;

L_o – відстань між вісьовими лініями двох паралельних провідників, $L_o = 6,5 (\text{см})$;

За зазначеними вище параметрами виконано розрахунок (5.12).

$$M = 0,02 \left(22,1 \cdot \lg \frac{\sqrt{(22,1^2 + 6,5^2)} + 22,1}{6,5} - \sqrt{(22,1 + 6,5)} + 6,5 \right) = 0,04 (\text{нГн}) \quad (5.12)$$

Висновок: маємо, що індуктивність між двох паралельних найдовших провідника на платі дорівнює 40 пГн, що мало.

5.2 Розрахунок надійності друкованого вузла

Надійність – це властивість об'єкта зберігати в часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

Надійність друкованого вузлу визначається надійністю всіх елементів, що встановлюються на ДП, власне самою ДП, пайкою. Відмова елементу, який встановлено на платі веде до відмови роботи пристрою.

Основні показники надійності:

- інтенсивність відмов, таблична величина ($\lambda(t)$), визначається виробником для окремих елементів чи за довідником [47] [48];

- імовірність безвідмовної роботи ($P(t)$);
- середній час напрацювання до відмови – $T_{\text{ср}}$;
- імовірність відмови приладу ($Q(t)$);

Імовірність відмов приладу – це експериментальна величина, але можливі і аналітичні розрахунки, які наведені у довіднику [48]. Вона залежить від ряду параметрів: температури навколишнього середовища, вологості, якості виробництва, режиму роботи, сфери і умов використання та іншого. При розрахунку використовуються формули, які наведені нижче.

Інтенсивність відмов, це сукупність табличних параметрів, розрахованих за формулою (5.13). [48]

$$\lambda_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \lambda_{\text{елем}_{ij}} \prod_{k=1}^p \pi_{ijk} \quad (5.13)$$

де: $\lambda_{\text{елем}}$ – вірогідність відмови елементу, год⁻¹;

l – кількість блоків;

i – нумерація блоків від 1 до l ;

m – кількість елементів у блоці;

j – нумерація елементів у блоці від 1 до m ;

π – коефіцієнти для кожного типу елементів (вологість, тиск, температура та інші);

p – кількість елементів у блоці;

k – нумерація коефіцієнтів елемента кожному блоці від 1 до p .

Середній час напрацювання до відмов (5.14). [48]

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda} \quad (5.14)$$

Імовірність безвідмовної роботи приладу (5.15). [48]

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (5.15)$$

Імовірність відмови приладу це зворотна величина від імовірності безвідмовної роботи приладу. За стандартами взятими з довідника військового відомства Сполучених Штатів Америки буде вестись розрахунок і звідти

будуть отримані дані імовірності відмови приладу [47]. Це фундаментальний довідниковий матеріал, на базі якого будується майже всі стандарти світу у галузі надійності, ДСТУ теж посилається на нього.

Для розрахунку було побудовано файл у програмі Excel [49]. У ньому використані дані з [47]. Розрахунок вівся при різних температурах навколишнього середовища, таких як, 20°C, 50°C і 80°C, тобто були обрані нормальні і граничні умови роботи приладу.

Середовищем, у якому працює прилад, обрано Gm за американською специфікацією, що означає «Обладнання, вбудоване на колісних або гусеничних транспортних засобах, і обладнання, що перевозиться вручну; включає в себе наземне допоміжне обладнання для тактичних ракет, устаткування мобільного зв'язку, системи тактичного управління вогнем, портативне обладнання для зв'язку, лазерні позначення і далекоміри» [47]. (текст наведено у перекладі). Для розрахунку 5CSEBA6U23I7 Intel були використані дані розробника з офіційного сайту [50].

Також слід зазначити, що для розрахунку цифрових і цифро-аналогових мікросхем використовується формула (5.16).

$$\lambda_{\text{елем}} = (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) \pi_Q \pi_L \quad (5.16)$$

де: C_1 – інтенсивність відмов у залежності від кількості транзисторів у елементі, год⁻¹;

C_2 – інтенсивність відмов у залежності від кількості виводів і типу корпусу, год⁻¹;

π_T – коефіцієнт температурного режиму;

π_E – коефіцієнт режиму роботи (літак, автівка та інше);

π_Q – коефіцієнт якості елементу;

π_L – коефіцієнт стресової завантажки кнопки/процесору (частота натискань/перемикачів, роботи).

Після розрахунку, який приведений у додатку Т, були отримані дані інтенсивності відмов для 20°C, аналогічно розраховано для 50°C і 80°C. Ці дані наведені в таблиця 5.1.

Таблиця 5.1 – Розрахунок інтенсивності відмов при різних температурах

Ім'я	Значення при різних температурних режимах, год ⁻¹		
	20°C	50°C	80°C
Резистори	5.78952	11.8422	22.3686
Конденсатори	0.97167	3.482146	9.982293
Роз'єми	3.576518	5.89536	9.039552
Транзистори	0.477692	0.812076	1.433075
Діоди	6.912	11.0592	34.56
Кнопки чи перемикачі	0.72	0.72	0.72
Індуктивність	13.99464	21.0672	21.0672
Пам'ять	0.9006	1.83854	2.8986
Цифрові мікросхеми	2.425581	2.496881	2.735581
Цифро-аналогові мікросхеми	0.564	0.794	1.564
Датчики	0.306	0.306	0.306
Кварцові резонатори	0.32	0.32	0.32
Інше	0.904275	11.8422	22.3686
Загальна	37.86	61.54	107.90

З цих даних добре видно, що при збільшенні температури надійність зменшується, при всіх однакових вхідних даних. Маючи загальну інтенсивність відмов можна розрахувати середній час напрацювання до відмови за формулою (5.14), результат наведено у таблиця 5.2.

Таблиця 5.2 – Середній час напрацювання до відмови

Ім'я	Значення при різних температурних режимах		
	20°C	50°C	80°C
Середній час, год	26411	16250	9268
Середній час, рік	3,0	1,9	1,1

Можна зробити висновок, що гарантійний час роботи складає приблизно 2 роки, це дуже добрий показник.

Також при аналізі даних зручно використати графік ймовірностей безвідмовної роби і ймовірності відмови, розрахунок проведений за формулою (5.15). Графік наведено на (рисунок 5.1).

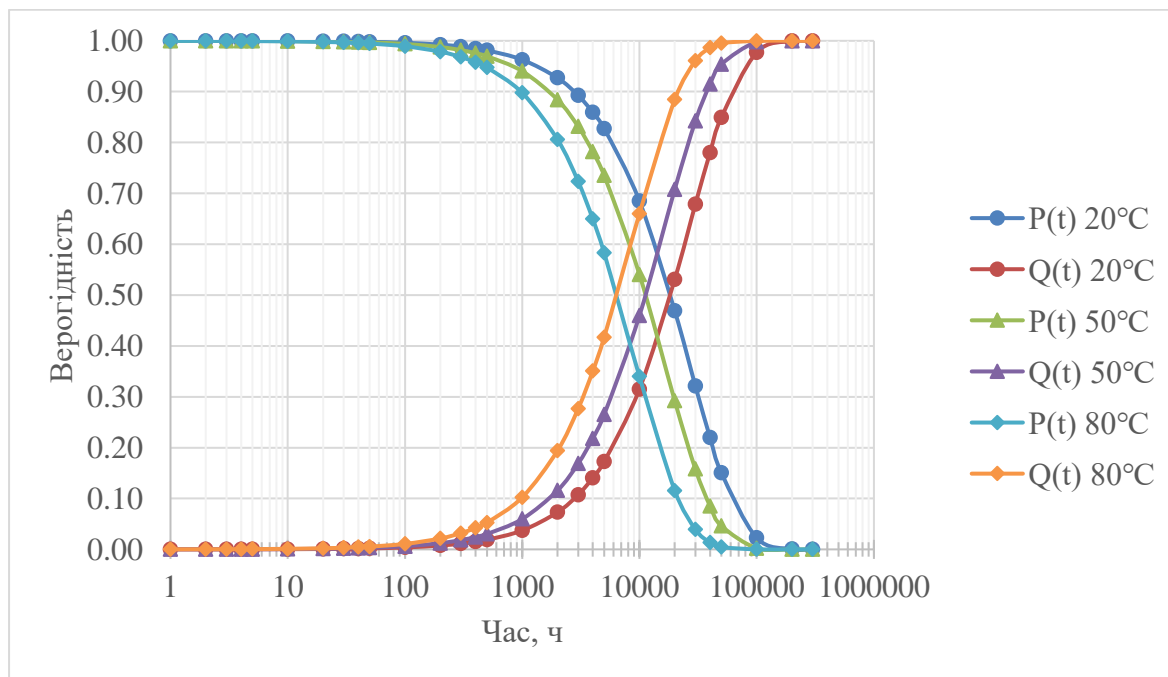


Рисунок 5.1 – Графік залежності без відмовної роботи і відмов друкованої плати від часу

Коли графік відмов перетинається з графіком коректної роботи, це означає, що ймовірність зламу 50%. Ці перетини були проаналізовані для кожної з температур і отримані дані:

- 20°C – 20000 год;
- 50°C – 11000 год;
- 80°C – 5000 год.

Тобто прилад починає ламатися після 20 тисяч годин, це майже півтора роки. У цьому розрахунку враховані тільки раптові відмови, послідовні не були враховані.

Не великий час безвідмовної роботи пов'язаний з дуже великою кількістю деталей, приблизно 700 елементів. При розрахунку вважалось, що всі елементи з'єднані послідовно, це означає, що не були враховані паралельні вхідні канали, чи фільтри для АЦП, при виході з ладну одно з них, прилад працює і надалі. Також плата має декілька інтерфейсів передачі даних, це означає, що всі вони не будуть працювати одночасно і матимуть різний коефіцієнт навантаження. При ускладненні моделі, час напрацювання до відмови ймовірно збільшиться. Але це дуже ускладнює розрахунки.

5.3 Розрахунок віброміцності друкованої плати

Зовнішні механічні навантаження впливають на пристрій, який розробляється, при його транспортуванні в неробочому стані. Тому важливо знати чи достатньою є його міцність. Для цього буде проведено розрахунок віброміцності. Розрахунок буде виконано за методикою, наведеною методикою у дверелі.

При розрахунку віброміцності потрібні характеристики матеріалу, з якого виготовлено друковану плату, маса та габаритні розміри плати і маса всіх її елементів [51] [52].

Основні параметри склотекстоліту FR-4 [35]:

					ДК61.416123.001ПЗ	68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- тимчасовий опір: $\sigma_T = 105$ (МПа);
- модуль Юнга: $E = 3,02 \cdot 10^{10}$ (Па);
- коефіцієнт Пуассона: $\mu = 0,22$;
- показник затухання: $\varepsilon = 0,06$;
- питома вага: $\rho_{FR-4} = 2050$ (кг/м³);
- питома щільність: $\nu = 2,05 \cdot 10^4$ (Н/м³);
- коефіцієнт запасу міцності: $n_1 = 2$.

Плата пристрою, що проєктується, має лінійні розміри 140 мм x 140 мм x 2 мм. Маса друкованої плати розраховується за (5.17).

$$m_{\text{дп}} = \rho \cdot V = \rho_{FR-4} \cdot a \cdot b \cdot c = 0,08036 \text{ (г)} \quad (5.17)$$

Далі розраховується маса елементів друкованої плати, за даними наведеними у додатку У. Загальна маса елементів на платі становить: 90 г. Коефіцієнт перенавантаження $n = 8$.

Вибраний тип кріплення друкованої плати у корпусі – жорстке по 4 сторонах. Формула для розрахунку (5.18). [52]

$$\alpha = \pi^2 \cdot \left(1 + \frac{a^2}{b^2}\right) = 22,37 \cdot 1 + \frac{0,14^2}{0,14^2} = 19,74 \quad (5.18)$$

Визначення коефіцієнту K_B за (5.19).

$$K_B = \frac{1}{1 + \frac{m_g}{m_{\text{дп}}}} = \frac{1}{1 + \frac{0,08}{0,09}} = 0,69 \quad (5.19)$$

Визначення циліндричної жорсткості D у (5.20) [52]

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = \frac{3,02 \cdot 10^{10} \cdot 0,002^3}{12 \cdot (1 - 0,22^2)} = 21,16 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (5.20)$$

Визначення власної частоти коливань друкованої плати (5.21) [52].

$$f_{\text{влас}} = \frac{K_B \alpha}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot g}{\nu \cdot h}} = \frac{0,69 \cdot 19,74}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,14^2} \cdot \sqrt{\frac{21,16 \cdot 9,81}{2,05 \cdot 10^4 \cdot 0,002}} = 248 \text{ (Гц)} \quad (5.21)$$

Якщо власні коливання більше за 250 Гц, то конструкція абсолютно жорстка. Частота коливання плати, що розроблюється 248 Гц, це досить добре для плати таких розмірів, а саме 140 мм на 140 мм.

Амплітуда вібрації на частоті резонансу обчислюється за (5.22).

$$A = \frac{0,25 \cdot n}{f_{\text{влас}}^2} = \frac{0,25 \cdot 8}{248^2} = 3,3 \cdot 10^{-5}(\text{м}) \quad (5.22)$$

Визначення коефіцієнту динамічності (в скільки разів амплітуда на вимушених коливаннях відрізняється від амплітуди на власній частоті коливань) (5.23).

$$K_D = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_{\text{влас}}}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{f \cdot \varepsilon}{f_{\text{влас}}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{10}{248}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{10 \cdot 0,06}{248}\right)^2}} \quad (5.23)$$

$$= 1,00$$

Визначення динамічного прогину друкованої плати (5.24).

$$W = K_D \cdot A = 1,00 \cdot 3,3 \cdot 10^{-5} = 3,3 \cdot 10^{-5}(\text{м}) \quad (5.24)$$

Якщо порівняти W і h . Тобто динамічний прогин плати допустим, тому, що повинна виконуватися умова $(W < \frac{1}{5}h)$, $5 \cdot 10^{-5} < 4 \cdot 10^{-4}$ умова виконується.

Рівномірно розподілене динамічне навантаження (5.25).

$$P_D = \frac{W \cdot D}{c_1 \cdot b^4} \quad (5.25)$$

Розрахуємо коефіцієнт c_1 .

$$c_1 = 0,00406 + 0,018 \cdot \log_{10} \frac{a}{b} = 0,00406 + 0,018 \cdot \log_{10} \frac{140}{140} \approx 0,00406$$

Розрахунок розподільного динамічного навантаження за формулою (5.25) наведено у (5.26).

$$P_D = \frac{3,3 \cdot 10^{-5} \cdot 21,16}{0,00406 \cdot 0,14^4} = 2,2 \cdot 10^2(\text{Н/м}^2) \quad (5.26)$$

Визначення максимального розподільного прогінного моменту

$$M_{\text{max}} = c_2 \cdot P_D \cdot b^2 \quad (5.27)$$

Розрахуємо коефіцієнт c_1 .

$$c_2 = 0,0479 + 0,018 \cdot \log_{10} \frac{a}{b} = 0,00479 + 0,018 \cdot \log_{10} \frac{140}{140} \approx 0,00406$$

Розрахунок максимального розподільчого прогінного моменту (5.28).

$$M_{max} = 0,00406 \cdot 4,4 \cdot 10^2 \cdot 0,14^2 = 0,64(\text{Н}) \quad (5.28)$$

Допустиме напруження для матеріалу друкованої плати (5.29).

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{\sigma_t}{n_1} = \frac{105}{2} = 52,5 \text{ (МПа)} \quad (5.29)$$

Для виконання умов вібромічності необхідно (5.30).

$$\sigma_{max} \ll \sigma_{\text{доп}} \quad (5.30)$$

Розрахунок σ_{max} наведено у (5.31).

$$\sigma_{max} = \frac{6 \cdot M_{max}}{h^2} = \frac{6 \cdot 0,42}{0,002^2} = 6,2 \cdot 10^5 \text{ (МПа)} \quad (5.31)$$

Тобто умова виконується.

Також було проаналізовано максимальний прогин друкованої плати від різних частот (від 1 Гц до 1 МГц). Результат розрахунку продемонстровано на (рисунок 5.2).

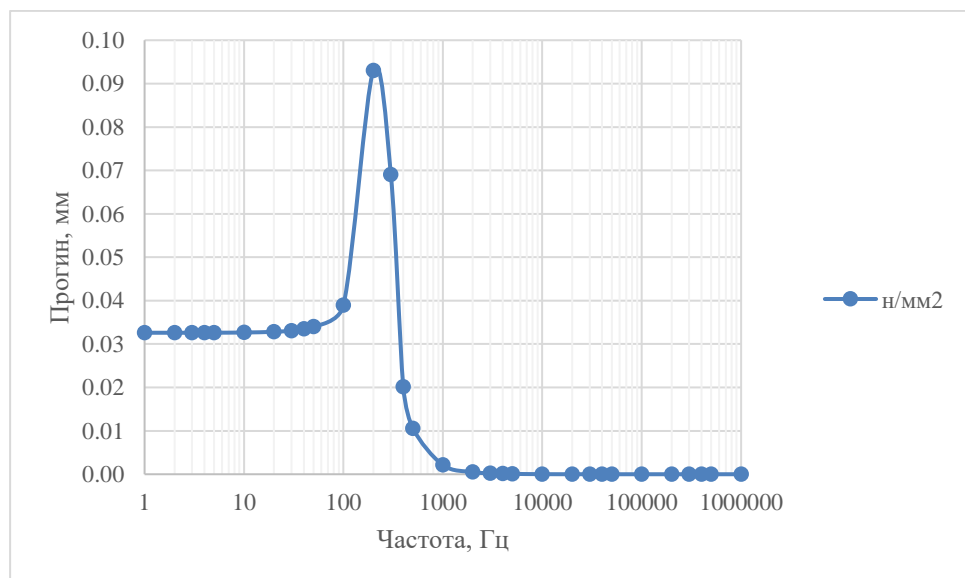


Рисунок 5.2 – Залежність зміни максимального прогину друкованої плати від частоти вимушених коливань

Висновок: частота коливань плати – 248 Гц. При цій частоті прогин досягає 0,09 мм. Це допустимо, конструкція добре захищена від вібрації.

5.4 Розрахунок температурного режиму роботи приладу

Тепловий комфорт (температура у приладі) це дуже важлива характеристика, для можливості аналізу охолодження, розрахунку вентиляційних отворів і тому подібне.

Для розрахунку теплового комфорту у приладі була побудована 3D модель плати у програмі SolidWorks [45]. Модель складається з примітивів, для зменшення часу симуляції і прискорення розробки. Потім завдяки плагіну SolidWorks Flow Simulation [53] було побудовано модель, яка містить матеріали кожного з елементів та його потужність. На її базі обраховано характеристики з такими вхідними даними: температура навколишнього середовища – 20 °С, в тиск 101,3 кПа. Результати моделювання наведено у додатку Ф.

5.5 Розрахунок ціни виробу

Для перевірки ступеню привабливості приладу на ринку розрахована загальна ціна виробу.

Ціна плати складається з ціни всіх елементів, доставки, ціни друкованої плати і монтажу елементів. Плата буде виготовлюватися і збиратися на заводі в Китаї [42]. Для розрахунку було враховано не одиничний прилад для виробництва, а серію з однієї тисячі екземплярів. Всі дані для розрахунку наведені у додатку У. Тобто це 17174 грн за плату, ще є корпус, пропоновано виготовлювати методом лиття під тиском в Україні [54]. Серія корпусів з 1000 екземплярів буде коштувати 100000 грн, тобто 100 грн один корпус.

Висновок: загальна ціна приладу складає 17274 грн. Що значно менше ніж у конкурентів.

Висновок розділу

У даному розділі були проведені розрахунки, що підтверджують правильність конструкторсько-технологічних рішень.

Падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику складає 70 мВ, що допустимо, бо менше, ніж 5% напруги 3,3В.

Потужність втрат друкованої плати становить 1,058 нВт, це мало, тому робимо висновок, що робота схеми не буде впливати на функціонування друкованої плати та матеріал, що обрано, підходить для її виготовлення.

Розраховані значення ємності між двома сусідніми провідниками, що становить 153,5 пФ, та взаємної індуктивності, яка дорівнює 40 пГн, дозволяють стверджувати, що вони майже не впливають на роботу приладу.

Були проведені розрахунки надійності роботи пристрою. В залежності від температури навколишнього середовища безвідмовний час роботи пристрою становить:

- 20°C – 20000 год;
- 50°C – 11000 год;
- 80°C – 5000 год.

Це задовольняє вимогам ТЗ. Розрахунки було зроблено лише для раптових відмов.

Після проведення розрахунку віброміцності друкованої плати можна стверджувати, що конструкція добре захищена від вібрації, адже при частоті коливань плати 248 Гц прогин досягає 0,09 мм.

В програмі SolidWorks була побудована модель пристрою, в якій вказані матеріали та розсіювана потужність елементів, проведена симуляція роботи пристрою та визначено, що для надійної роботи необхідне примусове охолодження. В пристрій був встановлений вентилятор. Для нього були створені отвори в корпусі.

					ДК61.416123.001ПЗ	73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 6 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У даному розділі буде розглянуто проєктування програмного забезпечення для ПК і FPGA, також розробка протоколу передачі даних між пристроєм вимірювання і користувачем. В межах дипломного проєкту передбачається написання програмного забезпечення для передачі по UART.

6.1 Протокол передачі даних

У протоколі передачі даних не будуть використовуватися протоколи самосинхронізації і виправлення помилок, тому що пристрій плановано використовувати з коротким дротом до одного метру при дротовому під'єднанні до ПК по протоколу USB. Також ці алгоритми зменшують швидкість передачі сигналу.

Є два схожих протоколи з'єднання: один відправляє дані з ПК на пристрій, а інший – у зворотню сторону. Розглянемо кожен з них окремо.

Протокол передачі даних з пристрою на комп'ютер.

Протокол містить у собі:

- преамбулу, яка складається з 0x55AA55AA (у шістандцятковому коді);
- довжину, це довжина посилки, скільки даних буде передано;
- індекс, це дані, що передаються;
- команда, що саме робити.

Детальне зображення з довжиною у бітах кожної частини наведено на (рисунок 6.1)

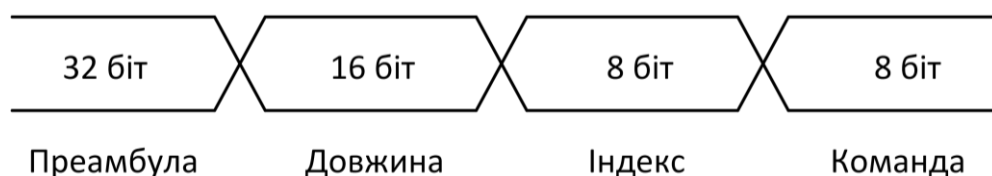


Рисунок 6.1 – Протокол передачі даних з пристрою на комп'ютер

Протокол передачі даних з комп'ютера на пристрій

Протокол дуже схожий на попередній, але містить у собі ще адресу регістра, у який потрібно записати команду. Тобто якщо є декілька налаштувань, то вони відправляються послідовно на пристрій за відповідними адресами. Протокол наведено в (рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 – Протокол передачі даних з комп'ютера на пристрій

6.2 Програма на FPGA

На даному етапі створена програма на FPGA і взаємодія з ПК виконується за протоколом UART, частина з процесором не під'єднана, так як це тестовий варіант. Програма відповідає блок-схемі наведеній – рисунок 6.3.

Кількість цифрових каналів – 8. Вони під'єднані до шини даних, яка в свою чергу – до тригера. Тригер реагує на сигнали і виконує відправку даних на блок відправки (UART). Блок обрання режиму роботи, відповідає за контроль над пристроєм, вибір який режим тригера працює, які канали детектувати і так далі.

Блок (UART) перетворює паралельний сигнал з тригера на послідовний за вказаним вище протоколом і відправляє його на ПК.

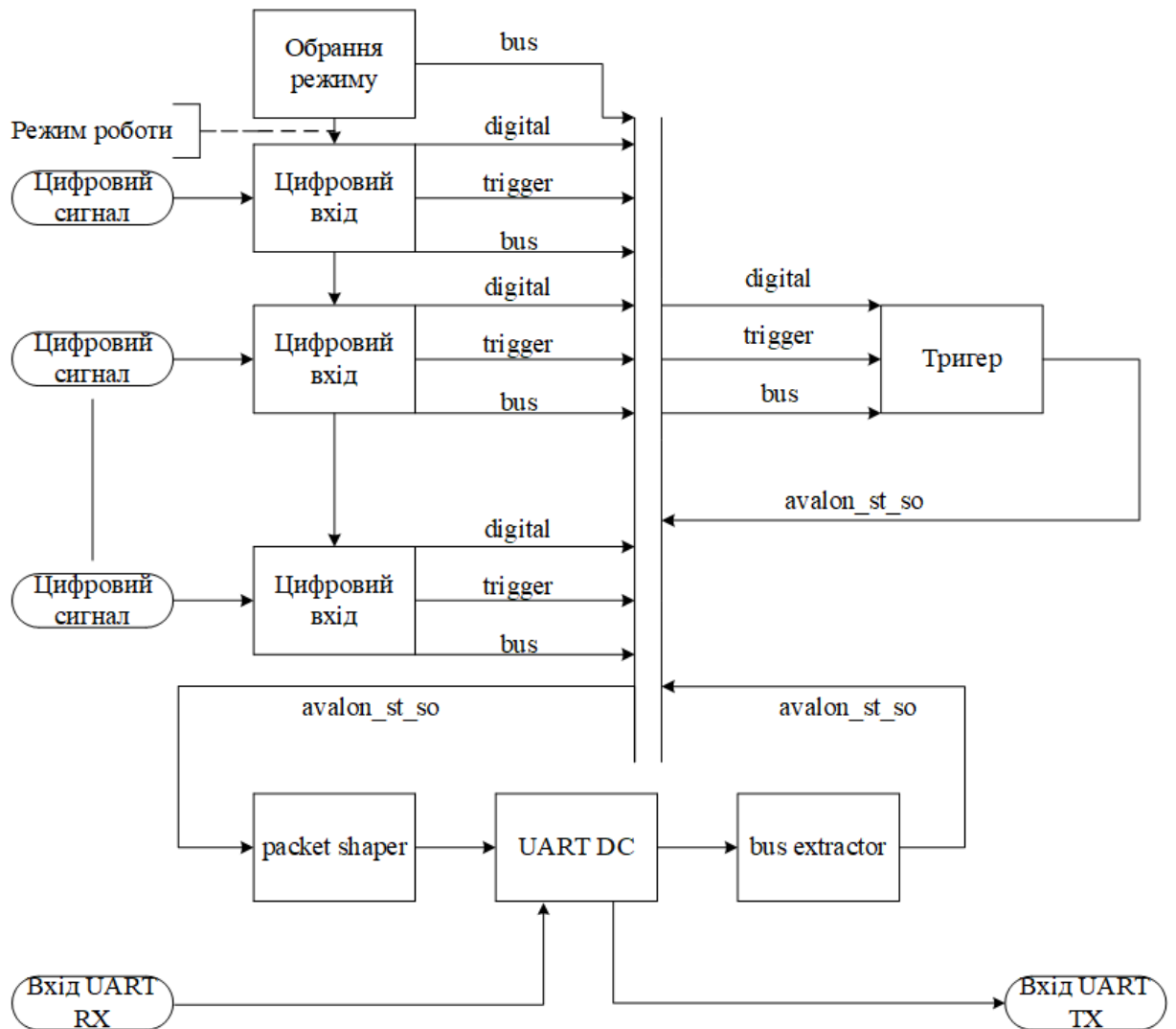


Рисунок 6.3 – Блок-схема програми на FPGA

6.3 Програма на ПК

Спочатку було побудовано алгоритмічну блок-схему, яка описує принципи взаємодії між блоками програмного коду, це такі основні блоки як: прийом даних з USB (по COM порту), обробка і відображення даних, застосування налаштувань, інтерфейс користувача. (рисунок 6.4)

Пояснення до рисунку. Драйвер COM порту – програма яка відповідає за прийом і передачу даних між пристроєм і ПК. Блок налаштувань – налаштування для пристрою (швидкість запису, час запису та інше), передаються за допомогою COM порту. Обробка графіків – прийом даних із

драйверу COM порту та передача на блок відображення даних, де будуеться графік (виконується перетворення даних і аналіз). Відображення даних на дисплей користувача – це інтерфейс користувача, який складається з графічного відображення програми, графіків, кнопок налаштувань інтерфейсу та інше. Обробка дій користувача – оброблює всі натискання кнопок, пересування графіків на дисплеї та інші дії, які не передаються у сторони підпрограми. А ось при збільшенні масштабу графіка чи переміщенні ліній дослідження – відправляє дані на блок обробки графіків, де виконується перерисовується зображення на дисплеї, це дуже ресурсномістка задача.

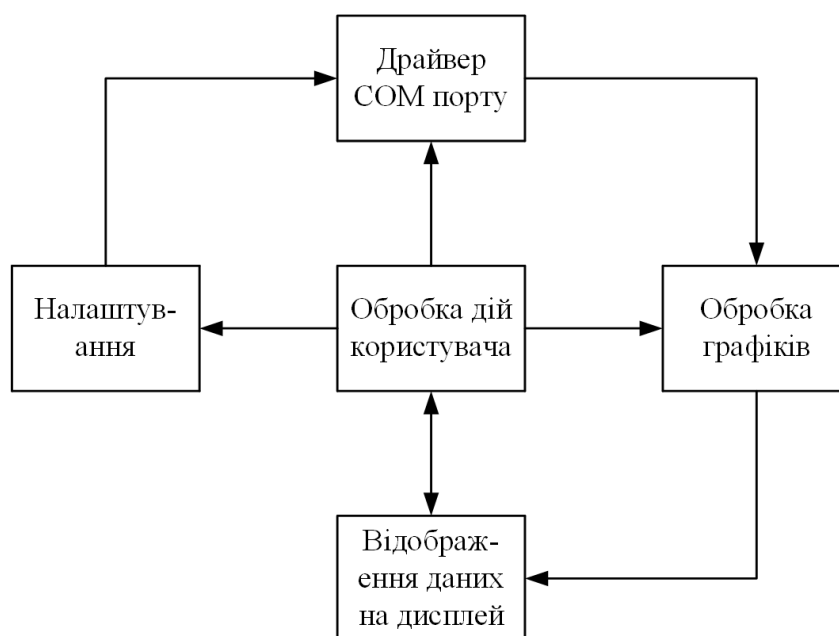


Рисунок 6.4 – Структурна блок-схема програми на ПК

Також на побудованій блок-схемі була максимально зменшена залежність одного блоку від іншого, циклічні залежності є, але вони не суттєві, тому при зміні одного блоку мінімізовано збій у інших [55].

Наступного кроку був розроблений і протестований блок драйверу передачі даних з зовнішнім інтерфейсом, так як це досить складна частина. У нього, як і у будь-якого драйвера, стандартні інтерфейси, а саме: ініціалізація, зчитування і запис, ще була додана обробка помилок і налаштування швидкості

передачі та імені порту, через який буде здійснюватися підключення. Для розробки коду було використано бібліотеки з фреймворку Qt, а саме, QSerialPort і QSerialPortInfo. Завдяки ним спрощена робота з зовнішніми інтерфейсами. Також була створена бібліотека можливих помилок передачі даних, яка декодує помилки, що виникли при передачі даних. Після чого все було протестоване у парі з макетною платою DE10 Nano, саме на якій побудовано прототип пристрою [56].

При розробці програми було враховано досвід аналогічних програм конкурентів [2]. Тому інтерфейс по структурі побудовано схожим чином. При розробці дизайну для інтерфейсу використовувалося програмне забезпечення Figma [57]. Розроблений макет програми можна подивитися у додатку Ц чи за посиланням [58].

Після чого розпочалась розробка саме програмного забезпечення для користувача. Програму написано на мові програмування C++, а саме на фреймворку Qt [59], який має великі можливості і популярність серед розробників ІОТ пристроїв. Програма має повністю динамічний інтерфейс і відповідає розробленому вище дизайну. При зміні розмірів екрану чи пересуванні все перерисовується, також є можливість зміни кількості каналів для відображення.

Сама програма складається з декількох рівнів, але найбільш цікавий з них, це блок побудови кожного з каналів. Усі канали однакові і для комп'ютера та мають тільки різні індекси. З ними можна виконувати різні дії: пересувати один відносно одного на екрані, змінювати налаштування та інше, при цьому є можливість застосування загальних налаштувань. У каналі є такі параметри як: зміна типу триггеру при записі на пристрої, зміна назви каналу, зміна типу прив'язки ліній детектування (до точки чи переміщення мишкою), і саме графік, який має повністю динамічну структуру. При побудові графіків використовувалася зовнішня бібліотека QCustomPlot [60]. Вона рекомендована для використання авторами Qt, це знак якості продукту.

При застосуванні налаштувань є можливість їх запам'ятовування для подальшої роботи, запис виконується у файл *settings.ini*, при вимиканні програми і наступному запуску налаштування зберігаються у пам'яті пристрою.

Програмне забезпечення має зручний інтерфейс, дозволяє керувати приладом, відслідковувати сигнали, які надходять з плати.

Також реалізований наступний функціональні можливості:

- зміна варіантів триггеру сигналу (по передньому чи задньому фронту, високому чи низькому сигналу, або без триггеру);
- налаштування часу запису сигналу;
- налаштування частоти запису сигналу;
- налаштування СОМ порту приладу, через який під'єднано і яка швидкість роботи;
- можливість пересування і перейменування сигналів в інтерфейсі, а також їх поодинокі або синхронне масштабування;
- можливість виставлення лінійки вимірів на графіках для відображення часу детектування.

Розроблений інтерфейс продемонстровано у додатку Ц.

Висновок розділу

Було розроблено програмне забезпечення для приладу і комп'ютеру для передачі по UART, також розроблені протоколи передачі даних. Програмне забезпечення для тестового зразка відповідає умовам ТЗ і має широкі можливості налаштування, що в свою чергу дуже зручно при подальшій розробці і тестуванні приладу. Програма для ПК має багатофункціональний та зручний інтерфейс.

					ДК61.416123.001ПЗ	79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У даному дипломному проєкті розроблено архітектурне рішення для подальшої реалізації багатофункціонального й універсального логічного аналізатора на базі технології FPGA, що відповідає вимогам, поставленим у технічному завданні.

По-перше було зроблено аналіз ринку логічних аналізаторів і визначені основні параметри приладу, що розробляється. Вирішено було розробляти логічний аналізатор з можливістю аналізу як цифрових, так і аналогових сигналів. Кількість цифрових каналів взято 24, аналогових – 8. Крім того, визначені частоти сигналів, які аналізуються: 50 МГц для цифрових та 250 кГц для аналогових сигналів. Прийняте рішення реалізувати дротові та бездротовий протоколи передачі даних: Wi-Fi, USB, Ethernet. Проведено патентний пошук, у результаті чого не було знайдено патентів на прилади з аналогічними характеристиками.

Після цього була розроблена блок-схема пристрою, яка містить в собі всі блоки, що необхідні для його роботи, такі як: блок обробки даних, цифровий блок, оперативна пам'ять, Wi-Fi, UART, Ethernet, датчик температури. Також створено схему живлення та структурну схему пристрою. На основі структурної схеми зроблено вибір елементів, враховуючи вимоги технічного завдання та новітню компонентну базу. На основі структурної схеми та вибраної елементної бази була розроблена схема електрична принципова. При її розробці використовувалися стандартні схеми включення з технічної документації розробника та відповідні рекомендації для елементів. Проведено розрахунок антIALайзінгових фільтрів у Filter Design Tool та їх моделювання в Tina-Ti для підтвердження розрахунків. Розраховано біполярне живлення на платі в САПР LTspice.

У даному проєкті були виконані конструкторсько-технологічні розрахунки, які необхідні для виконання розміщення елементів на друкованій

					ДК61.416123.001ПЗ	80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

платі та її трасування. У ході розрахунків було визначено, що необхідно обрати 5 клас точності для виконання друкованої плати. Розрахована мінімальна ширина друкованого провідника для ланцюгів живлення всіх напруг. Проведені розрахунки достатнього діаметру всіх контактних отворів та діаметрів контактних майданчиків для них. Визначена мінімальна відстань між провідником та контактним майданчиком.

Також був здійснений вибір типу та матеріалу друкованої плати. Прийнято рішення виготовляти 14 шарову друковану плату з матеріалу FR4. Проведене розміщення компонентів на платі за функціональними ознаками, а потім проведене трасування друкованої плати в САПР Altium Designer вручну.

У даній роботі проведено розрахунки, що підтверджують правильність конструкторсько-технологічних рішень. Розрахунок показав, що падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику складає 70 мВ, що допустимо, бо менше, ніж 5% напруги 3,3В. Потужність втрат друкованої плати становить 1,058 нВт, це мало, тому робимо висновок, що робота схеми не буде впливати на функціонування друкованої плати. Розраховані значення ємності між двома сусідніми провідниками (153,5 пФ) та взаємної індуктивності (40 пГн) дозволяють стверджувати, що вони майже не впливають на роботу приладу. Розрахунки надійності роботи пристрою показали, що середній час напрацювання на відмову становить приблизно 20000 год, що задовольняє вимогам в ТЗ. Розрахунки віброміцності друкованої плати показали, що конструкція добре захищена від вібрації, адже при частоті коливань плати 248 Гц прогин досягає 0,09 мм.

Також було проведено тепловий аналіз моделі приладу в SolidWorks, розроблено програмне забезпечення для приладу й комп'ютера для передачі по UART з використанням Intel Quartus Prime та Qt, розроблені протоколи передачі даних. Дизайн інтерфейсу користувача розроблено за допомогою додатку Figma. Програмне забезпечення для тестового зразка відповідає умовам ТЗ і має широкі можливості налаштування.

У ході виконання дипломного проєкту розроблена необхідна конструкторська документація на логічний аналізатор з використанням SolidWorks, Autodesk AutoCAD, Microsoft Excel. ТЗ виконано в повному обсязі, проведені розрахунки й моделювання підтверджують працездатність пристрою.

Проектна апробація результатів була зроблена на міжнародній науково-технічній XIII конференції молодих вчених «Електроніка – 2020».

					ДК61.416123.001ПЗ	82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Логічний аналізатор [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://goo.su/18ie> (дата звернення: 04.05.2020). – DigiView™ Logic Analyzer Models.
2. Logic Analyzers from Saleae Inc [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.saleae.com/ (дата звернення: 10.05.2020). – Логічний аналізатор моделі.
3. Відчувати себе комфортно завдяки логічному аналізатору. Feeling Comfortable with Logic Analyzers : веб-сайт. URL: <https://goo-gl.su/yivP0bkf> (дата звернення: 04.05.2020).
4. Основи застосування логічних аналізаторівзадача синхронізації. Keysight technologies : веб-сайт. URL: <https://tinyurl.com/ycucelrc> (дата звернення: 04.05.2020).
5. АКИП-9103/1. АКИП : веб-сайт. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/919/DOC000919991.pdf> (дата звернення: 05.05.2020).
6. Digilent Instrumentation Family. Digilent : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15WH> (дата звернення: 05.05.2020).
7. Сусліков Л.М., Дьордяй В.С. Патентознавство. Київ : Центр навчальної літератури, 2005. 232 с.
8. Espacenet: free access to over 110 million patent documents. Пошук патентів Espacenet : веб-сайт. URL: <https://worldwide.espacenet.com/> (дата звернення: 15.05.2020).
9. Патент CN108319200A Portable internet logic analyzer. Пошук патентів Espacenet : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15wn> (дата звернення: 15.05.2020).
10. Патент JPH01299471A LOGIC ANALYZER. Сайт для пошуку патентів Espacenet : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15Wo> (дата звернення: 15.05.2020).
11. Патент GB2233102A Logic analyzer. Сайт для пошуків патентів Espacenet : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15wo> (дата звернення: 15.05.2020).

					ДК61416123.001ПЗ	83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Гольденберг Л.М., Матюшкін Б.Д., Поляк М.Н. Цифрова обробка сигналів. 5th ed. Москва : Радио и связь, 1985. 312 с.
13. Слюсар В.И. Влияние нестабильности такта АЦП на угловую точность линейной цифровой антенной решетки. Радіоелектроніка. 1998. № 6. С. 77 – 80.
14. Слюсар В.И., Бондаренко М.В. Потенциальная точность пеленгации в цифровых антенных решетках в условиях джиттера АЦП. Військово-технічний збірник. Берез. 2010. № 8. С. 22 – 26.
15. Linacre House JH, editor. Demystifying Switched-Capacitor Circuits. Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Pxford, Paris, San Deigo, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo : Elsevier, Newnet, 2006. 331 с.
16. Вакуленко М.О., Вакуленко. О.В. Вакуленко О.В. Тлумачний словник із фізики. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. 767 с.
17. Сторінка товару 5CSEMA6F31I7N. Інтернет магазин Mouser : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15WP> (дата звернення: 06.05.2020).
18. Сторінка товару 10AS016E4F29E3SG. Інтернет магазин Mouser : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15wP> (дата звернення: 06.05.2020).
19. Сторінка у магазині 5AGXMA5G4F35C5G. Інтернет магазин Mouser : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15Wq> (дата звернення: 06.05.2020).
20. Сторінка у магазині 10AS027E4F29E3SG. Інтернет магазин Mouser : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15wq> (дата звернення: 06.05.2020).
21. Сторінка у магазині 5CEBA9F31C7N. Інтернет магазин Mouser : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15WQ> (дата звернення: 06.05.2020).
22. Документація на LTC2320-14. Analog Devices, Inc. : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15w1> (дата звернення: 09.05.2020).
23. Документація AD7606B. Analog Devices, Inc. : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15Wk> (дата звернення: 09.05.2020).

24. Filter Design Tool. Texas Instruments Incorporated : веб-сайт. URL: <https://goo.su/18i6> (дата звернення: 19.05.2020).
25. Програмне забезпечення Tina-Ti. Texas Instruments Incorporated : веб-сайт. URL: <http://www.ti.com/tool/TINA-TI> (дата звернення: 19.05.2020).
26. Елемент OPA2690. Texas Instruments Incorporated : веб-сайт. URL: <https://www.ti.com/product/OPA2690> (дата звернення: 19.05.2020).
27. Посилання на мікросхему LT1111. Мікросхема Analog Devices : веб-сайт. URL: <https://goo.su/18ID> (дата звернення: 19.05.2020).
28. Документація на елемент LT1111. Analog Devices : веб-сайт. URL: <https://goo.su/18Ib> (дата звернення: 19.05.2020).
29. Документація на елемент OPA2690. Texas Instruments Incorporated : веб-сайт. URL: <https://goo.su/18Hw> (дата звернення: 19.05.2020).
30. LTspice. Analog Devices : веб-сайт. URL: <https://goo-gl.su/h45nPFTO> (дата звернення: 19.05.2020).
31. Документацію на серію Intel Cyclone V. Компанія Intel : веб-сайт. URL: <https://goo-gl.su/Y7txqOe> (дата звернення: 16.05.2020).
32. Early Power Estimators and Power Analyzer. Сайт компанії Intel : веб-сайт. URL: <https://goo-gl.su/n6w5GLU7> (дата звернення: 16.05.2020).
33. PowerPlay Early Power Estimator. Сайт компанії Intel : веб-сайт. URL: <https://goo-gl.su/ZRgl1Uu> (дата звернення: 16.05.2020).
34. Основные параметры конструкции. ГОСТ 23751-86 Платы печатные : веб-сайт. URL: <https://goo.su/18iD> (дата звернення: 15.05.2020).
35. IPC-2221A-DE: SUPERSEDED BY IPC-2221B-DE. IPC International, Inc. : веб-сайт. URL: <https://goo.su/18i8> (дата звернення: 16.05.2020).
36. Компонент 2-406549-1. Інтернет магазин Digi-Key Electronics : веб-сайт. URL: <https://goo.su/18IC> (дата звернення: 17.05.2020).
37. Документація MUSBB15134. Інтернет магазин Digi-Key Electronics : веб-

					ДК61416123.001ПЗ	85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- сайт. URL: <https://goo.su/18ib> (дата звернення: 17.05.2020).
38. Документація BNC(75)-PLR-PC-12G-1. Інтернет магазин Digi-Key Electronics : веб-сайт. URL: <https://goo.su/18iA> (дата звернення: 17.05.2020).
 39. Документація 54-00134. Інтернет магазин Digi-Key Electronics : веб-сайт. URL: <https://goo.su/18hW> (дата звернення: 17.05.2020).
 40. Губар В.Г. Методичні матеріали з предмету ФТОК. Київ : КПП, 2015. 100 с.
 41. Друкована плата. Вікіпедія : веб-сайт. URL: <https://goo.su/15wL> (дата звернення: 09.05.2020).
 42. Сторінка замовлення PCBWay. PCBWay PCB Prototype the Easy Way : веб-сайт. URL: <https://www.pcbway.com/> (дата звернення: 06.05.2020).
 43. Городилин В.М. Методы изготовления печатных плат. 2nd ed. Москва : Высшая школа, 1983. 176 с.
 44. Altium. Програмне забезпечення Altium : веб-сайт. URL: <https://www.altium.com/> (дата звернення: 10.05.2020).
 45. Solidworks. Програмне забезпечення Solidworks : веб-сайт. URL: www.solidworks.com (дата звернення: 10.05.2020).
 46. Друковані плати електричні властивості базових матеріалів. Технології : веб-сайт. URL: <https://goo.su/18iC> (дата звернення: 18.05.2020).
 47. Military handbook Reliability prediction of electronic equipment. 1st ed. The Official Home Page of the United States Army, 1991. 150 с.
 48. Надёжность электрорадиоизделий. 2nd ed. Москва : ЦНИИИ МО РФ, 2004. 641 с.
 49. Excel. Офіційний сайт компанії Microsoft : веб-сайт. URL: <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/excel> (дата звернення: 23.05.2020).
 50. Intel. Reliability report. 1st ed. Intel Corporation, 2017. 62 с.
 51. Обеспечение виброустойчивости печатных плат. SkatPro : веб-сайт. URL: <https://goo.su/1aKc> (дата звернення: 23.05.2020).

52. Е.Б. Романова О.В.К.А.Ю.К. Основы конструирования электронных средств: практикум. Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2017. 53 с.
 53. SOLIDWORKS Flow Simulation. Офіційний сайт SolidWorks : веб-сайт. URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation> (дата звернення: 24.05.2020).
 54. Виготовлення корпусу. Klona : веб-сайт. URL: <https://klona.ua/> (дата звернення: 24.05.2020).
 55. Martin R.C. Clean Architecture. Boston, Columbus, Indianapolis, New York, San Francisco, Amsterdam, Cape Town, Dubai, London, Madrid, Milan, Munich, Paris, Montreal, Toronto, Delhi, Mexico City, Sao Paulo, Sydney, Hong Kong, Seoul, Singapore, Taipei, Tokyo : Prentice Hall, 2018. 352 с.
 56. DE10 Nano макетна плата для прототипування. Terasic Inc. All Rights Reserved : веб-сайт. URL: <https://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&No=1046> (дата звернення: 06.06.2020).
 57. Where teams design together. Figma : веб-сайт. URL: <https://www.figma.com/> (дата звернення: 06.06.2020).
 58. Макет програми. Figma : веб-сайт. URL: <https://go-gl.com/1x1CB5e> (дата звернення: 06.06.2020).
 59. Головна сторінка. The Qt Company : веб-сайт. URL: <https://www.qt.io/> (дата звернення: 06.06.2020).
 60. Бібліотека для побудови графіків. QCustomPlot : веб-сайт. URL: <https://www.qcustomplot.com/> (дата звернення: 06.06.2020).
 61. Пашков В.П. Основы технологии аэрокосмического проектирования. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. 2012, 2012. 17 с.
- ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Вид офіц. Київ, 1996. 75 с. (Інформація та документація).

					ДК61416123.001ПЗ	87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. [Чинний від 2017-07-01]. Вид офіц. Київ, 2016. 31 с. (Інформація та документація).

ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання. [Чинний від 2016-07-01]. Вид офіц. Київ, 2016. 17 с. (Інформація та документація).

ГОСТ 23751-86. Платы печатные. Основные параметры конструкции. [На заміну ГОСТ 23751-79; чинний від 1986-05-19] Вид. офіц. Москва, 1986. 7 с. (Інформація та документація).

ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. [Чинний від 2003-07-02]. Вид офіц. Москва, 2004. 169 с. (Інформація та документація).

					ДК61.416123.001ПЗ	88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Технічне завдання на проєктування

1. Найменування та галузь використання.

1.1. Логічний аналізатор на FPGA ДК61.411614.001 призначається для потреб промисловості та побутового використання (для постачання закордон).

1.2. Логічний аналізатор на FPGA призначений для вимірювання і аналізу цифрових і аналогових сигналів. Параметри дослідження для цифрових сигналів: частота, прогальність; для аналогових сигналів: частота, амплітуда, довжина хвилі. Прилад переносний, застосування у опалювальних приміщеннях і за їх межами.

2. Підстави для розробки.

2.1. Підставою для розробки є завдання на дипломне проєктування згідно наказу по ФЕЛ.

3. Мета і призначення розробки.

3.1. Необхідність даної розробки спричинена підвищенням вимог до функціональності та універсальності логічних аналізаторів.

3.2. Прилад призначається для автоматичного вимірювання й дослідження цифрових і аналогових сигналів.

3.3. Прилад, що розробляється є новою розробкою, яка створюється з самого початку.

3.4. Прилад призначається для серійного виробництва.

4. Технічні вимоги.

4.1. Склад виробу і вимоги до пристрою, що розробляється.

4.1.1. Пристрій складається з одного друкованого вузлу. Він повинен мати більше 16 цифрових каналів і більше 4 аналогових. Пристрій має у своєму складі процесор, який оброблює інформацію, захист цифрових входів, аналого-цифровий перетворювач, антialайзінговий фільтр для кожного аналогового

					ДК61.416123.001ПЗ	89
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

входу, оперативну пам'ять, пам'ять для програмування. Протоколи зв'язку з користувачем: USB, Wi-Fi, Ethernet.

4.2. Показники призначення.

4.2.1. Дозволяє вимірювати цифрові сигнали (частоту і прогальність).
Кількість каналів – більше 16.

4.2.2. Дозволяє вимірювати аналогові сигнали (частоту, довжину хвилі і амплітуду). Кількість каналів – більше 4.

4.2.3. Живлення пристрою +5 В від джерела постійного струму, струмом не менше 1 А.

4.3. Вимоги до надійності.

4.3.1. Середній час напрацювання на відмову логічного аналізатору на FPGA повинен бути не менш ніж 10000 год.

4.4. Вимоги до технологічності.

4.4.1. Орієнтовані на передові прийоми виготовлення деталей і складання.

4.5. Вимоги до рівня уніфікації і стандартизації.

4.5.1. Максимально використовувати стандарти й уніфіковані деталі і вироби.

4.6. Вимоги безпеки обслуговування.

4.6.1. Керуватися загальними вимогами безпеки до апаратури низької напруги ГОСТ 12.2.007-75.

4.7. Вимоги до складальних частин виробу, сировини, вихідних й експлуатаційних матеріалів.

4.7.1. Для створення логічного аналізатора на FPGA використовувати закордоні та вітчизняні покупні вироби.

4.8. Умови експлуатації.

4.8.1. Кліматичні виконання й категорія експлуатації УХЛ 3.0 за ГОСТ 15150-69.

4.9. Вимоги до транспортування та зберігання.

					ДК61.416123.001ПЗ	90
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.9.1. Група умов зберігання В4.2 за ГОСТ 15150-69. Зберігати в закритих опалювальних вентильованих приміщеннях.

4.9.1.1. Температура повітря від +1°C до +45°C.

4.9.1.2. Відносна вологість повітря 75% при 27°C.

4.9.1.3. Атмосферний тиск від 84 кПа до 106 кПа.

4.9.2. Транспортування автомобільним, авіа, морським і залізничним транспортом у транспортній тарі.

4.10. Додаткові технічні вимоги.

4.10.1. Напруга живлення пристрою від зовнішнього незалежного джерела +5 В і номінальний струм не менш 1 А.

4.10.2. Діапазон виміру цифрового сигналу від 1,2 В до 5 В (логічні рівні).

4.10.3. Діапазон виміру аналогового сигналу від -5 В до +5 В.

4.10.4. Максимальна частота цифрового сигналу 50 МГц.

4.10.5. Максимальна частота аналогового сигналу 250 кГц.

4.10.6. Матеріал корпусу – пластик.

4.10.7. Зручність в експлуатації.

4.10.8. Можливість під'єднання до комп'ютера за дротовим інтерфейсом передачі даних USB, Ethernet.

4.10.9. Можливість під'єднання до приладу користувача за бездротовим інтерфейсом передачі даних Wi-Fi.

4.10.10. Можливість застосування налаштувань заданих користувачем з комп'ютеру чи іншого приладу:

4.10.10.1. Зміна частоти відцифровки;

4.10.10.2. Зміна частоти дискретизації;

4.10.10.3. Зміна кількості записаних відліків;

4.10.10.4. Зміна триггеру сигналу (високий/низький сигнал, передній/задній фронт, немає).

4.10.11. Елементну базу використовувати по можливості з найкращими технічними характеристиками.

4.10.12. Всі розрахунки вести в міжнародній системі одиниць СІ.

4.10.13. Створення схеми електричної принципової.

4.10.14. Створення друкованої плати, на підставі схеми електричної принципової.

4.10.15. Розрахунок характеристик друкованої плати:

4.10.16. Створення корпусу для пристрою.

4.10.17. Створення програмного забезпечення для плати.

4.10.18. Створення програмного забезпечення для користувача.

5. Результати роботи

5.1. Результати даного дипломного проєкту можуть бути використані як вхідна документація по створенню прототипу пристрою, його програмування, налагоджування, подальше впровадження в серійне виробництво.

5.2. Даний дипломний проєкт після виконання передається на кафедру КЕОА для подальшого захисту й зберігається як навчальна документація.

6. Дипломний проєкт повинен містити в собі документи.

6.1. Пояснювальну записку.

6.2. Схему електричну принципову. Формату А2.

6.3. Схему електричну структурну. Формат А2.

6.4. Креслення друкованої плати. Формат А2.

6.5. Складальне креслення друкованої плати. Формат А1.

6.6. Креслення корпусу пристрою. Формат А2.

6.7. Креслення кришки пристрою. Формат А2.

6.8. Складальне креслення пристрою. Формат А1.

6.9. Перелік елементів плати. Формат А4.

6.10. Перелік елементів приладу. Формат А4.

6.11. Специфікація на плату. Формат А4.

6.12. Специфікація на пристрій. Формат А4.

					ДК61.416123.001ПЗ	92
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.13. Додатки.

7. Порядок розгляду й приймання дипломного проєкту.

7.1. Порядок розгляду й приймання дипломного проєкту на загальних умовах, прийнятих в університеті НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського.

7.2. Рецензування й прийняття дипломного проєкту комісією на загальних умовах.

7.3. У процесі виконання дипломного проєкту проміжні звіти видаються науковому керівнику не рідше одного разу на тиждень на загальних умовах.

8. Економічні показники.

8.1. Лімітна ціна становить 30000 грн.

					ДК61.416123.001ПЗ	93
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

Патентний пошук

Запит «Logic analyzer internet»

Знайдено тільки один результат під номером: CN108319200A·2018-07-24 від автора: Shi Na; Tian Xin; Yu Ding; Zhang Hong; Zhang Qian; Zhang Shi. [9]

У патенті аналізуються тільки цифрові сигнали, пропонується аналізувати аналогові та цифрові сигнали.

Також у патенті використовується FPGA, а в пристрої, який розробляється, пропонується використовувати SOC. Цитата з патенту: «The portable internet logic analyzer according to claim 1, wherein said logic data analyzer is provided with a high performance low power FPGA programmable chip, and said FPGA programmable chip comprises two large capacity SRAM memory chips. Used as data staging and as an FPGA configuration and function extension, as well as a JTAG interface.». [9]

У патенті також використовується сенсорний дисплей. За розрахунками це значно підвищить ціну пристрою і збільшить розміри. Але функціональність не збільшить. Цитата з патента про LCD дисплей: «A portable Internet logic analyzer, comprising: a logic data analyzer, an embedded system board, a data acquisition circuit, a clock trigger circuit, an LCD touch display screen...». [9]

З цього можна зробити висновок, що патенти не повторюються. Розробляється унікальний пристрій, тому що:

- аналізуються цифрові і аналогові сигнали, а в патенті тільки цифрові;
- SOC замість FPGA.

Запит «Logic analyzer analog»

За цим запитом було знайдено декілька різних патентів.

Патент JPH01299471A·1989-12-04

Цей патент від автора Tanjiyuu Kenji. [10]

					ДК61.416123.001ПЗ	94
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цей патент на аналіз і зчитування логічним аналізатором цифрового і аналогового сигналу. Цитата з патента: «PURPOSE:To make it possible to perform semi-permanent continuous analysis and the display of the result, by providing a D/A converter and an analog display device, and directly displaying the data of the result of the analysis. CONSTITUTION:Input data S1 are received in a logic analyzer from an object device 1 for analysis. The logic level of the input data S1 is judged in a comparator 2. The data are converted into binary digital information. Address information and data information are imparted into a buffer memory 3 as logic level input data S2. A control signal, a status signal and error information are imparted into a logic generator 4 as logic level control signals S3. The generator 4 outputs a control signal S4 so that the data S2 are inputted and stored in the memory 3. The stored data are outputted based on a control signal S4 and sequentially stored in data memory 5. The stored data are also inputted into an A/D converter 9. Output data S5 from the memory 3 are converted into analog data S11 without passing through the memory S5. The data S11 are displayed on an analog display device 10 and recorded.» [10]

Цей патент 1989 року, у ньому використані застарілі технології, такі як: аналоговий сигнал виводиться в аналоговій формі. Також робота з пам'яттю виконується в SOC і не містить генераторів помилок чи інших речей.

Патент GB2233102A·1991-01-02 [11]

Автора: WILLIAMS P.

Використовує можливість модульного під'єднання аналогової частини до цифрового аналізатора, а потім зчитування цих даних по паралельному цифровому інтерфейсу. (рисунок Б.1) [11]

Цей патент зовсім інший, він збільшить універсальність приладу, але ускладнить продаж і виробництво, на думку автора. Цей патент не збігається з ідеєю приладу, який розробляється.

					ДК61.416123.001ПЗ	95
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

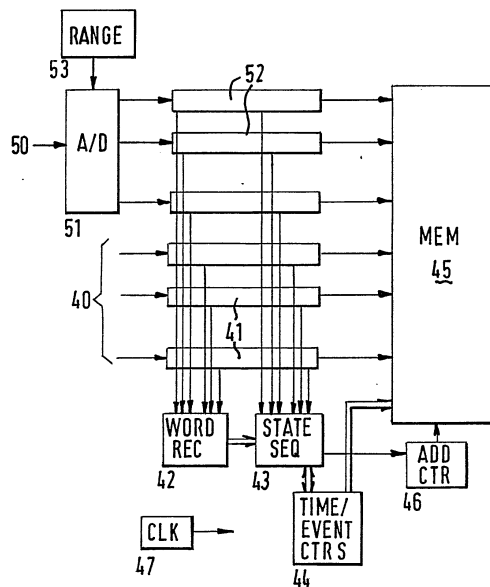


FIG. 2

Рисунок Б.1 – Блок-схема патента GB2233102A·1991-01-02

Запит «Logic analyzer SOC»

Всі патенти, що були знайдені за цим запитом, відносяться до робіт по налагодженню саме кристала і його програмуванню.

ДОДАТОК В

Блок-схема АЦП

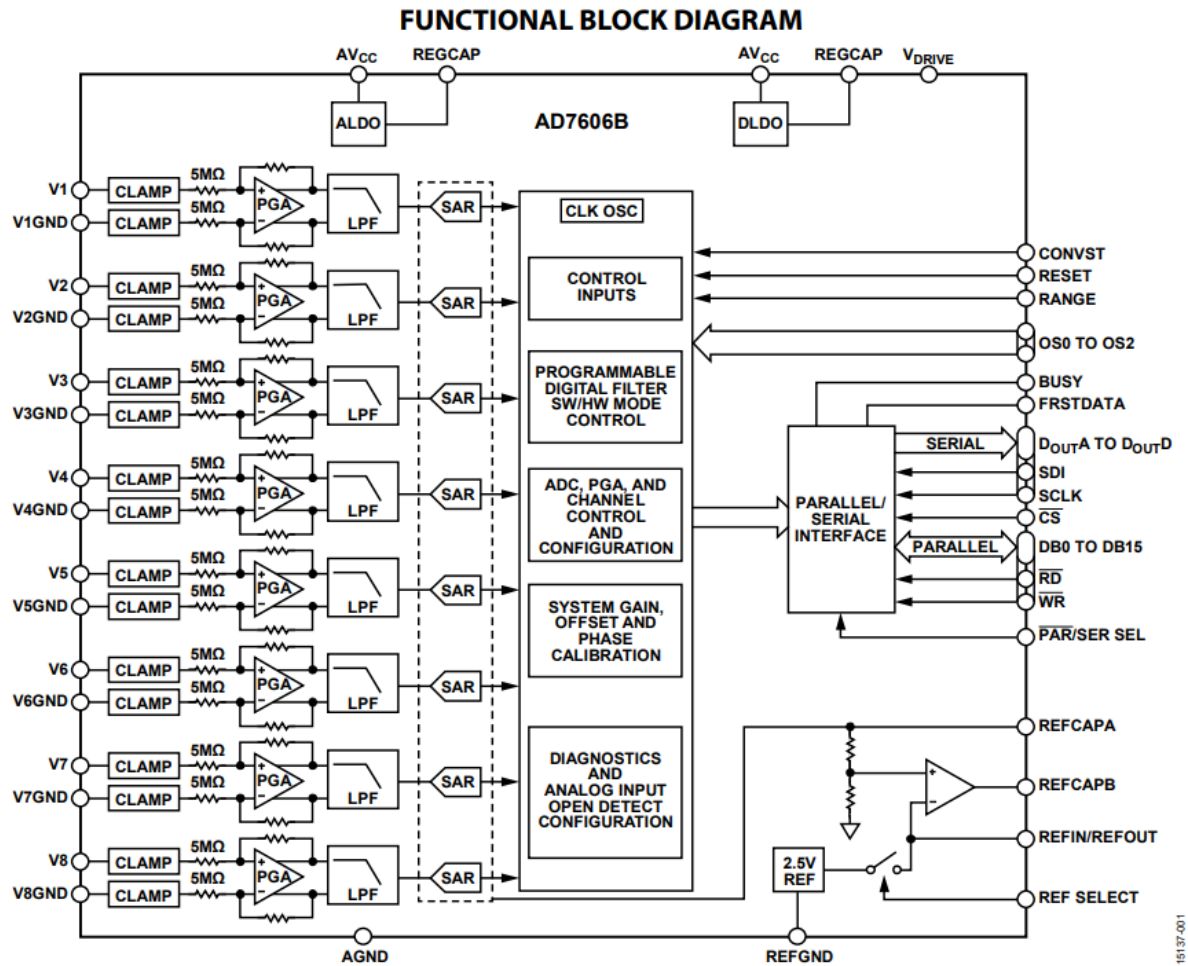


Figure 1.

Рисунок В.1 – Схема AD7606B

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДК61.416123.001ПЗ

ДОДАТОК Г

Технічна документація на елементи

Таблиця Г.1 – Технічна документація на елементи

Найменування	Посилання
AD7606BSTZ-RL Analog Devices Inc	https://www.digikey.com/product-detail/en/analog-devices-inc/AD7606BSTZ-RL/AD7606BSTZ-RLCT-ND/2467598
LTC3616IUDD#TRPB F Linear Technology/Analog Devices	https://www.digikey.com/product-detail/en/linear-technology-analog-devices/LTC3616IUDD-TRPBF/LTC3616IUDD-TRPBFTR-ND/2238464
LTC3612EUDC Linear Technology/Analog Devices	https://www.digikey.com/product-detail/en/linear-technology-analog-devices/LTC3612EUDC-PBF/LTC3612EUDC-PBF-ND/2136232
LT3080EMS8E Linear Technology/Analog Devices	https://www.digikey.com/product-detail/en/linear-technology-analog-devices/LT3080EMS8E-TRPBF/LT3080EMS8E-TRPBFTR-ND/1767821
TPS51200DRCR Texas Instruments	https://www.digikey.com/product-detail/en/texas-instruments/TPS51200DRCR/296-26978-2-ND/1907875
5CSEBA6U23I7 Intel	https://www.digikey.com/product-detail/en/intel/5CSEBA6U23I7N/544-3307-ND/3929193
KSZ9031RNX2R Microchip	http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/00002117f.pdf
74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	https://www.digikey.com/product-detail/en/nexperia-usa-inc/74LV4051BQ115/1727-6945-2-ND/1966034
SN74AXC1T45DRLR Texas_Instrument_Tea m	https://www.digikey.com/product-detail/en/texas-instruments/SN74AXC1T45DRLR/296-47599-2-ND/8021680
FT232R FTDI	https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf
TPD2E001DRLR Texas Instruments	http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpd2e001.pdf
TPS3831K33 Texas Instruments	http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps3831.pdf
ATWINC1500- MR210PB Microchip Technology	https://www.digikey.com/product-detail/en/microchip-technology/ATWINC1500-MR210PB/ATWINC1500-MR210PB-ND/5322332

Продовження таблиці Г.1

Найменування	Посилання
OPA2690ID Texas Instruments	https://www.digikey.com/product-detail/en/texas-instruments/OPA2690ID/296-13465-5-ND/486382
LT1111 Linear Technology/Anal og Devices	https://www.digikey.com/product-detail/en/linear-technology-analog-devices/LT1111CS8-PBF/LT1111CS8-PBF-ND/891686
IS43TR16256A- 15HBL ISSI	http://www.issi.com/WW/pdf/43-46TR16256A-85120AL.pdf
EPCS64 Intel	https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cfg/cy_c_c51014.pdf
LED 0603 green	https://imrad.com.ua/ru/smd0003-led-0603-green
SRF0905-472Y Bourns Inc.	https://www.digikey.com/product-detail/en/bourns-inc/SRF0905-472Y/SRF0905-472YTR-ND/2075958
LBC2518T471K Taiyo Yuden	https://www.digikey.com/product-detail/en/taiyo-yuden/LBC2518T471K/587-1941-2-ND/1170846
ELL-8UV470M Panasonic Electronic Components	https://www.digikey.com/product-detail/en/panasonic-electronic-components/ELL-8UV470M/PCD2141CT-ND/822215
LB3218T102K Taiyo Yuden	https://www.digikey.com/product-detail/en/taiyo-yuden/LB3218T102K/587-2041-2-ND/1788933
HI0805R800R-10 Laird-Signal Integrity Products	https://www.digikey.com/product-detail/en/taiyo-yuden/LB3218T102K/587-2041-2-ND/1788933
LQG18HN2N7S0 0D Murata Electronics	https://www.digikey.com/product-detail/en/murata-electronics/LQG18HN2N7S00D/490-1103-1-ND/584549
KLS7-TS6611- 1.5-180 KLS	https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/knopka-cls7-ts6611-1-5-180_98391.html
CDCE937PWRG 4 Texas Instruments	http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cdcel937.pdf
CZRU52C3V9 Comchip Technology	https://www.digikey.com/product-detail/en/comchip-technology/CZRU52C3V9/641-1026-2-ND/1121058
MBRS130T3G ON Semiconductor	https://www.digikey.com/product-detail/en/on-semiconductor/MBRS130T3G/MBRS130T3GOSTR-ND/918637

Продовження таблиці Г.1

Найменування	Посилання
BZX84C5V1LT1 G ON Semiconductor	https://www.digikey.com/product-detail/en/on-semiconductor/BZX84C5V1LT1G/BZX84C5V1LT1GOSTR-ND/918409
AO3415A Alpha & Omega Semiconductor Inc.	https://www.digikey.com/product-detail/en/alpha-omega-semiconductor-inc/AO3415A/785-1193-2-ND/2353858
ESD5V3U2U Infineon Technologies	https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ESD5V3U2USERIES-DS-v01_03-en.pdf?fileId=db3a30431b0626df011b0d3e3ca97dc0
HE8550G Unisonic Tech	https://lscsc.com/product-detail/Transistors-NPN-PNP_HE8550G-D-AB3-R_C146665.html
0901303108 Molex	https://www.digikey.com/products/en?keywords=901303108
2-406549-1 TE Connectivity AMP Connectors	https://www.digikey.com/product-detail/en/te-connectivity-amp-connectors/2-406549-1/A97715-ND/1122133
5031821852 Molex	https://www.digikey.com/product-detail/en/molex/5031821852/WM12834TR-ND/4693482
MUSBB15134 Amphenol ICC (Commercial Products)	https://www.digikey.com/product-detail/en/amphenol-icc-commercial-products/MUSBB15134/MUSBB15134-ND/1956304
BNC(75)-PLR-PC- 12G-1 Hirose Electric Co Ltd	https://www.digikey.com/product-detail/en/hirose-electric-co-ltd/BNC-75-PLR-PC-12G-1/H125477-ND/6173756
54-00134 Tensility International Corp	https://www.digikey.com/product-detail/en/tensility-international-corp/54-00134/839-1517-ND/9685443
ECS-240-10-37Q- AES-TR ECS Inc.	https://www.digikey.com/product-detail/en/ecs-inc/ECS-240-10-37Q-AES-TR/XC2424TR-ND/8023041

ДОДАТОК Д

Розрахунок струму і потужності SOC

Для розрахунку потрібно задати такі параметри, на головній сторінці:

- серія чипа;
- назва моделі;
- корпус;
- призначення (військове/комерційне);
- характеристики напруги;
- наявність радіатора;
- наявність примусового охолодження;

Які саме параметри задані, продемонстровано на (рисунок Д.1).

Input Parameters	
Family	Cyclone V
Device	5CSEBA6
Package	U23
Temperature Grade	Commercial
Power Characteristics	Maximum
V _{CCINT} Voltage (V)	1.10
Power Model Status	FINAL
<input type="radio"/> User Entered Tj <input checked="" type="radio"/> Auto Computed Tj	
Ambient Temp, T _A (°C)	25
<input type="radio"/> Custom Theta JA <input checked="" type="radio"/> Estimated Theta JA	
Heat Sink	None
Airflow	Still Air
Custom θ_{SA} (°C/W)	3.50
Board Thermal Model	JEDEC (2s2p)

Рисунок Д.1 – Розрахунок потужності SOC (основні вхідні параметри)

У файлі для розрахунку є декілька сторінок, далі наведено розгляд кожної з них.

Logic – відповідає за кількість логічних блоків у частині FPGA. Потрібно задати:

- LUT (кількість вхідних сигналів у кожен блок);
- FF (кількість логічних блоків);
- Clock (частота роботи);
- Toggle (який відсоток блоків перемикається кожний такт);
- Average Fanout (кількість вихідних сигналів з кожного блоку).

Результати заданих блоків і розрахунки наведені (рисунок Д.2).

З приведенного вище рисунка видно задані параметри, а у горі - загальну

Logic		Return To Main							
Total Thermal Power (W)	0.030								
Estimated LUT Utilization	0.0%								
FF Utilization	6.0%		more >>						

Thermal Power (W)									
Module	# LUTs	# FFs	Clock Freq (MHz)	Toggle %	Average Fanout	Routing	Block	Total	User Comments
main	5	10000	100	12.5%	4	0.022	0.008	0.030	

Рисунок Д.2 – Розрахунок потужності SOC (параметри Logic)

вживану потужність, відсоток заповнених логічних блоків і LUT блоків.

RAM – це пам'ять і все, що відноситься до неї. Параметри, які є необхідними для розрахунку, такі (наведені тільки найважливіші для розрахунку, на думку автора):

- RAM Type (тип пам'яті);
- RAM Blocks (кількість блоків);
- Data Width;
- RAM Depth;
- Clock (частота);

Були задані такі характеристики для цього аркушу (рисунк Д.3).

RAM	Return to Main	
Total Thermal Power (W)	0.092	
MLAB Utilization	0.0%	
M10K Utilization	72.3%	more >>

Рисунок Д.3 – Розрахунок потужності SOC (параметри RAM)

DSP – у цьому проєкті не використовується.

I/O – вхідні і вихідні порти. Задаються логічні рінні портів, струм і кількість. Результати розрахунку на (рисунок Д.4).

I/O	Return To Main	
Total Thermal Power (W)	0.006	
Off Chip Power (W)	0.000	
I/O Utilization	29.6%	more >>

Power Rails	Voltage (V)	Current (A)
V _{CCIO}	1.20	0.0000
V _{CCIO}	1.25	0.0000
V _{CCIO}	1.35	0.0000
V _{CCIO}	1.50	0.0000
V _{CCIO}	1.80	0.0000
V _{CCIO}	2.50	0.0005
V _{CCIO}	3.00	0.0000
V _{CCIO}	3.30	0.0013
V _{CCP0}	2.5	0.0013
V _{CCP0}	3.0	0.0000
V _{CCP0}	3.3	0.0035

A board trace model corresponding to the I/O standard you specify is applied to all output and bidirectional pins in the design. The model allows the EPE to more accurately estimate thermal power by accounting for the loads exerted by the board trace.

This device has 314 general purpose I/O pins and 0 HSSI I/O pins.

Рисунок Д.4 – Розрахунок потужності SOC (параметри I/O)

Загальна потужність 0,757 Вт. Цей блок споживає більш за всіх струму.

PLL – блок перетворення частоти. Потрібно задати тільки частоту сигналу і все. Готові параметри наведено на (рисунок Д.5).

PLL	Return to Main
Total Thermal Power (W)	0.068
PLL Utilization	66.7% more >>

This section only estimates power from the PLL blocks and does not include power from other blocks. Please enter additional parameters in the "Clocks" section.

Module	# PLL Blocks	Output Freq (MHz)	VCO Freq (MHz)	Total Power (W)
	1	100.0	700.0	0.017
	1	25.0	700.0	0.017
	1	150.0	700.0	0.017
	1	400.0	700.0	0.018
	0	0.0	700.0	0.000

Рисунок Д.5 – Розрахунок потужності SOC (параметри PLL)

Потужність, яку поглинає цей блок – 0,081 Вт.

Clocks – лінії з частотою.

Задаються параметри:

- Clock Freq (частота);
- Total Fanout (кількість блоків, які тактуються від неї);
- Globale Enable (видимість).

Розрахунок наведено на (рисунок Д.6).

Clocks	Return to Main
Total Thermal Power (W)	0.096 more >>

Domain	Clock Freq (MHz)	Total Fanout	Global Enable %	Local Enable %	Total Power (W)
	100.0	2000	100%	50%	0.013
	25.0	2000	100%	50%	0.003
	150.0	2000	100%	50%	0.020
	400.0	2000	100%	50%	0.053
	50.0	2000	100%	50%	0.007
	0.0	0	100%	50%	0.000
	0.0	0	100%	50%	0.000
	0.0	0	100%	50%	0.000
	0.0	0	100%	50%	0.000
	0.0	0	100%	50%	0.000
	0.0	0	100%	50%	0.000
	0.0	0	100%	50%	0.000
	0.0	0	100%	50%	0.000
	0.0	0	100%	50%	0.000
	0.0	0	100%	50%	0.000

Рисунок Д.6 – Розрахунок потужності SOC (параметри Clock)

HPS – сопроцесор, для нього встановлені такі параметри:

- частота кожного ядра процесора і завдання, яке він виконує (операційна система чи робота на кристалі);
- параметри оперативної пам’яті;
- всі блоки, які працюють, а саме: I²C, SPI, SDMMC, USB, Ethernet та інші.

Результат наведено на двох наступних аркушах (рисунок Д.7).

Hard Processor System	Return to Main
Total HPS Power (W)	0.763

The HPS page displays all powers and currents of HPS-specific rails

Rail	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)
V _{CC} HPS	1.10	0.251	0.276
V _{CCIO} HPS	1.20	0.000	0.000
V _{CCIO} HPS	1.35	0.000	0.000
V _{CCIO} HPS	1.50	0.054	0.082
V _{CCIO} HPS	1.80	0.000	0.000
V _{CCIO} HPS	2.50	0.000	0.000
V _{CCIO} HPS	3.30	0.032	0.106
V _{CCPD} HPS	2.50	0.043	0.107
V _{CCPD} HPS	3.30	0.000	0.001
V _{CCA} PLL HPS	2.50	0.012	0.031
V _{CCRSTCLK} HPS	2.50	0.000	0.001

CPU1

Frequency (MHz)	500
Application	Linux Idle
Application Mode	N/A

CPU2

Frequency (MHz)	500
Application	Linux Idle
Application Mode	N/A

SDRAM

Frequency (MHz)	400
Type	DDR3
Data Width	40

Рисунок Д.7 – Розрахунок потужності SOC (параметри HPS)

Bank	Voltage
6A-6B	1.50
7A	3.30
7B	3.30
7C	3.30
7D	3.30

Total Utilization (%)	0.00
------------------------------	-------------

CPU1 Utilization (%)

ALU	0.00
L1	0.00
L2	0.00

CPU2 Utilization (%)

ALU	0.00
L1	0.00

SDRAM Utilization (%)

READ	0.00
WRITE	0.00

Select Custom Application to make changes to user mode utilization. Total User Mode Utilization (ALU + L1 + L2 + SDRAM_READ + SDRAM_WRITE) must be ≤ 100% per core.

Peripherals			
Module	Usage	Voltage	Total Power (W)
Ethernet MAC 1	On	1.80	0.0000
Ethernet MAC 2	Off	1.80	0.0000
USB OTG 1	On	1.80	0.0000
USB OTG 2	Off	1.80	0.0000
NAND Flash Controller	Off	1.80	0.0000
QSPI Flash Controller	On	1.80	0.0000
SDMMC Controller	On	1.80	0.0000
UART 1	Off	1.80	0.0000
UART 2	Off	1.80	0.0000
CAN Controller 1	Off	1.80	0.0000
CAN Controller 2	Off	1.80	0.0000
I ² C 1	Off	1.80	0.0000
I ² C 2	Off	1.80	0.0000
I ² C 3	Off	1.80	0.0000
I ² C 4	Off	1.80	0.0000
SPI Master 1	Off	1.80	0.0000
SPI Master 2	Off	1.80	0.0000
SPI Slave 1	Off	1.80	0.0000
SPI Slave 2	Off	1.80	0.0000
Other	On	-	0.1074

Some peripheral combinations may not be feasible. See Device Pin-out File or Qsys HPS MegaWizard to determine valid combinations.

Рисунок Д.7

Після введення всіх параметрів, на першому аркуші виводиться готовий розрахунок.

Результати продемонстровано на (рисунок Д.8).

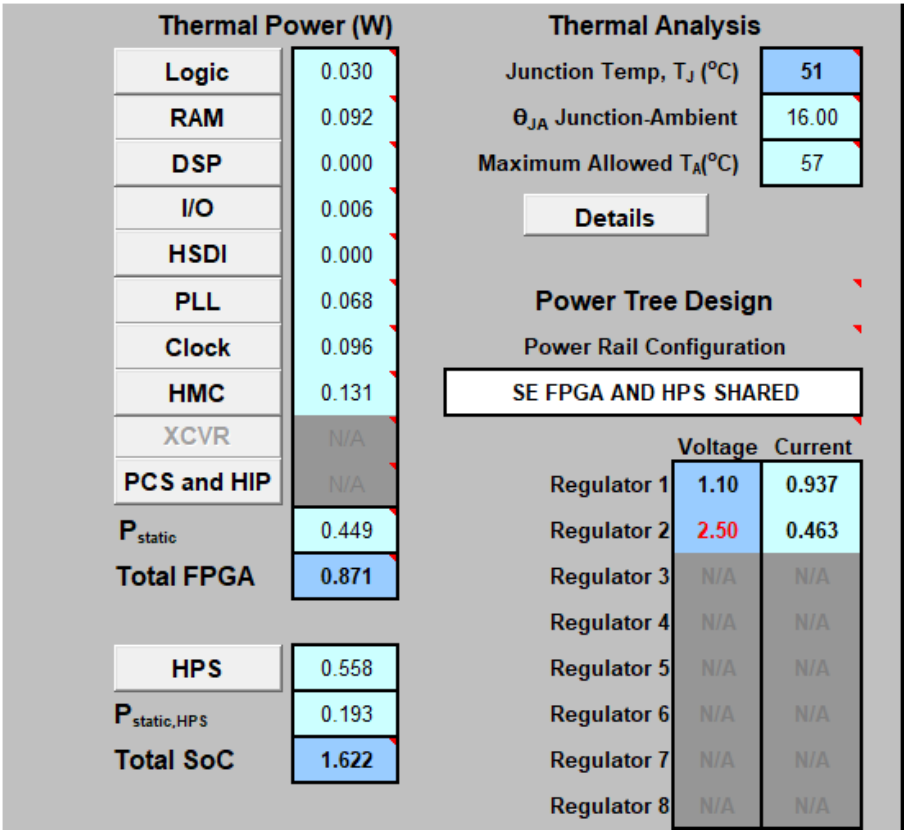


Рисунок Д.8 – Розрахунок потужності SOC результати

ДОДАТОК Е

Вживаний струм для 5 В

Таблиця Е.1 – Розрахунок вживаного струму для 5В

Елемент	Позначення на схемі	Кількість	Струм споживання одиниці(А)	Загальний струм споживання(А)
AD7606BSTZ-RL Analog Devices Inc	DA1	1	4.75E-02	0.0475
LTC3616IUDD#TRPBF Linear Technology/Analog Devices	DA2	1	7.50E-05	0.000075
LTC3612EUDC Linear Technology/Analog Devices	DA3, DA4	2	7.50E-05	0.00015
LT3080EMS8E Linear Technology/Analog Devices	DA5, DA6, DA7, DA9	4	7.50E-05	0.0003
TPS51200DRCR Texas Instruments	DA8	1	7.50E-04	0.00075
5CSEBA6U23I7 Intel	DD1	1	1.40E+00	1.4
KSZ9031RNX2R Microchip	DD2	1	5.00E-01	0.5
74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	DD3, DD12, DD21, DD33	4	2.00E-06	0.000008
SN74AXC1T45DRLR Texas Instrument Team	DD4, DD5, DD6, DD7, DD8, DD9, DD10, DD11, DD13, DD14, DD15, DD16, DD17, DD18, DD19, DD20, DD22, DD23, DD24, DD25, DD26, DD27, DD28, DD29	24	8.50E-06	0.000204
FT232R FTDI	DD30	1	2.50E-02	0.025
TPD2E001DRLR Texas Instruments	DD31	1	1.00E-07	1E-07
TPS3831K33 Texas Instruments	DD32	1	1.50E-07	1.5E-07

Продовження таблиці Е.1

Елемент	Позначення на схемі	Кількість	Струм споживання одиниці(А)	Загальний струм споживання(А)
ATWINC1500-MR210PB Microchip Technology	DD34	1	6.10E-02	0.061
OPA2690ID Texas Instruments	DD35, DD36, DD37, DD38, DD39, DD40, DD41, DD42, DD43, DD44, DD45, DD46, DD47, DD48, DD49, DD50	16	5.50E-03	0.088
LT1111 Linear Technology/Analog Devices	DD51, DD52, DD53, DD54	4	3.00E-04	0.0012
IS43TR16256A-15HBL ISSI	DS1	1	2.67E-03	0.00267
EPCS64 Intel	DS2	1	1.00E-04	0.0001
Загальне споживання (А)				2.13

ДОДАТОК Ж

Ширина провідника за IPC2221

(For use in determining current carrying capacity and sizes of etched copper conductors for various temperature rises above ambient.)

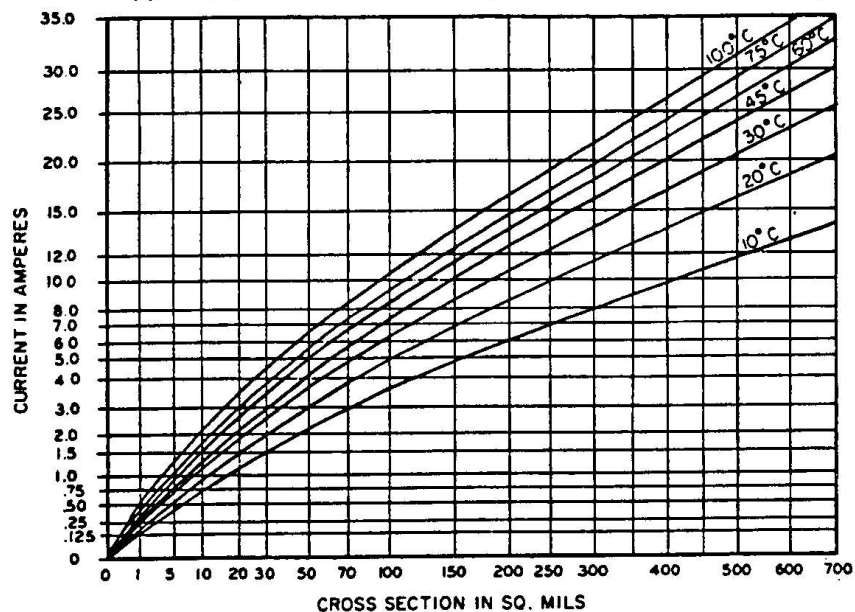


Figure A External Conductors

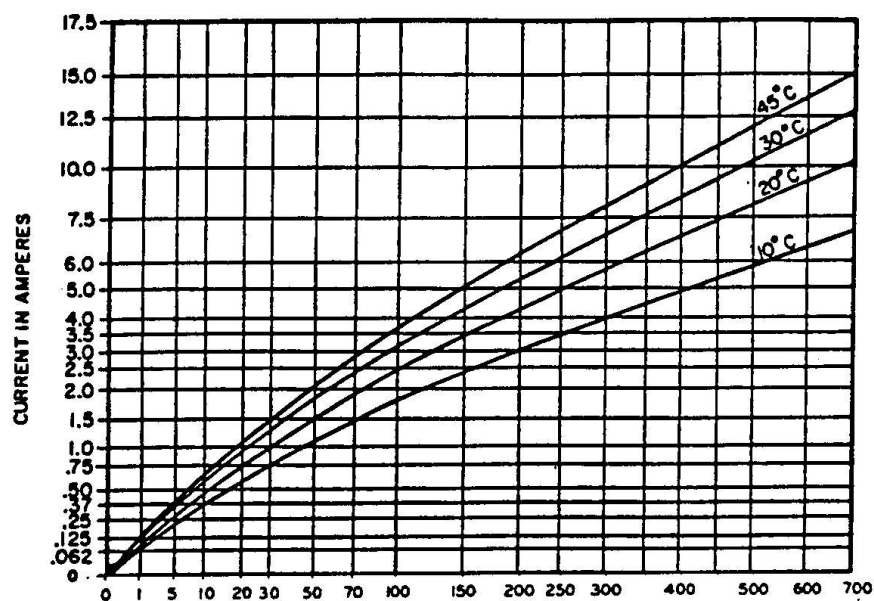


Figure C Internal Conductors

Рисунок Ж.1 – Зображення з IPC-2221A

А – відношення для зовнішніх провідників

С – параметри для внутрішніх провідників(у середині плати)

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДК61.416123.001ПЗ

ДОДАТОК И

Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму

Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму для 3,3 В. З креслень були обрані елементи тільки ті, що вживають 3,3 В. Це сама розгалужена система живлення і в неї самий великий струм споживання. Дані цих елементів наведені у таблиця И.1.

Таблиця И.1 – Розрахунок вживаного струму для 3,3 В

Елемент	Позначення на схемі	Кількість	Струм споживання одиниці(А)	Загальний струм споживання(А)
KSZ9031RNX2R Microchip	DD2	1	5.00E-01	0.5
74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	DD3, DD12, DD21, DD33	4	2.00E-06	0.000008
SN74AXC1T45DRLR Texas Instrument Team	DD4, DD5, DD6, DD7, DD8, DD9, DD10, DD11, DD13, DD14, DD15, DD16, DD17, DD18, DD19, DD20, DD22, DD23, DD24, DD25, DD26, DD27, DD28, DD29	24	8.50E-06	0.000204
FT232R FTDI	DD30	1	2.50E-02	0.025
TPD2E001DRLR Texas Instruments	DD31	1	1.00E-07	1E-07
TPS3831K33 Texas Instruments	DD32	1	1.50E-07	1.5E-07
ATWINC1500-MR210PB Microchip Technology	DD34	1	6.10E-02	0.061
EPCS64 Intel	DS2	1	1.00E-04	0.0001
74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	DD3, DD12, DD21, DD33	4	2.00E-06	8,00E-01
5CSEBA6U23I7 Intel	DD1	1	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Загальне споживання (А)				0,178

Розрахунок мінімальної ширини провідника живлення 3,3 В.

Розрахунок у формулі (И.1).

$$b_{min1} = \frac{0,178}{100 * 0,035 + 60 * 0,0615} = 0,03 \text{ (мм)} \quad (\text{И.1})$$

Звідси маємо, що за ГОСТом мінімальна ширина провідника при мінімальній щільності струму дорівнює 0,03 мм. При максимальній щільності струму – 0.014 мм. Це дуже мало, звичайно умова виконується, так як на платі мінімальна ширина провідника живлення напругою 3,3 В складає 0,3 мм.

За IPC-2221A ширина провідників для відповідного струму в залежності від температури наведені у таблиця И.2.

Таблиця И.2 – Ширина провідників 3,3 В живлення від температури за IPC-2221A

Температура	Ширина зовнішнього провідника (мм)	Ширина внутрішнього провідника (мм)
10	0,07	0,11
20	0,04	0,09
30	0,02	0,04
45	0,01	0,04
60	0,01	
75	0,01	
100	0,01	

Дані збігаються з розрахунками за ГОСТом, тому цей пристрій поки задовольняє умовам роботи при низьких температурах⁶⁾.

Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму для 2,5 В

З креслень були обрані елементи тільки ті, що вживають 2,5 В. Ці дані наведені у таблиця И.3.

⁶ Низькою температурою вважати температури більше 0°C.

Таблиця И.3 – Розрахунок вживаного струму для 2,5 В

Елемент	Позначення на схемі	Кількість	Струм споживання одиниці(А)	Загальний струм споживання(А)
74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	DD3, DD12, DD21, DD33	4	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$8.0 \cdot 10^{-6}$
5CSEBA6U23I7 Intel	DD1	1	$4.6 \cdot 10^{-1}$	$4.6 \cdot 10^{-1}$
Загальне споживання (А)				0,463

Розрахунок мінімальної ширини провідника живлення 2,5 В.

Розрахунок у формулі (И.2).

$$b_{min1} = \frac{0,463}{100 * 0,035 + 60 * 0,0615} = 0,07(\text{мм}) \quad (\text{И.2})$$

Звідси маємо, що за ГОСТом мінімальна ширина провідника при мінімальній щільності струму дорівнює 0,07 мм. При максимальній щільності струму – 0.031 мм. Це дуже мало, звичайно умова виконується, так як на платі мінімальна ширина провідника живлення напругою 2,5 В складає 0,3 мм.

За IPC-2221A ширина провідників для відповідного струму в залежності від температури наведені у таблиця И.4.

Таблиця И.4 – Ширина провідників 2,5В живлення від температури за IPC-2221A

Температура	Ширина зовнішнього провідника (мм)	Ширина внутрішнього провідника (мм)
10	0,11	0,33
20	0,09	0,2
30	0,06	0,15
45	0,04	0,11
60	0,04	
75	0,03	
100	0,02	

Дані збігаються з розрахунками за ГОСТом, тому цей пристрій поки задовольняє умовам роботи при низьких температурах⁷. Також дуже гарно прослідковується те, що на внутрішніх шарах, де полігони, потрібно використовувати дуже великі провідники, для захисту від згорання провідників. А на зовнішніх тонкі, саме це було враховане при створенні пристрою.

Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму для 1,8 В

З креслень були обрані елементи тільки ті, що вживають 1,8 В. Ці дані наведені у таблиця И.5.

Таблиця И.5 – Розрахунок вживаного струму для 1,8 В

Елемент	Позначення на схемі	Кількість	Струм споживання одиниці(А)	Загальний струм споживання(А)
74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	DD3, DD12, DD21, DD33	4	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$

Це живлення використовується тільки як опорне, для вхідної опорної напруги для цифрового входу. Тому розрахунок можна не, великих струмів не буде і розгалуженість провідника низька.

Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму для 1,5 В

З креслень були обрані елементи тільки ті, що вживають 1,5 В. Ці дані наведені у таблиця И.6.

⁷ Низькою температурою вважати температури більше 0°C.

Таблиця И.6 – Розрахунок вживаного струму для 1,5 В

Елемент	Позначення на схемі	Кількість	Струм споживання одиниці(А)	Загальний струм споживання(А)
74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	DD3, DD12, DD21, DD33	4	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$
IS43TR16256A-15HBL ISSI	DS1	1	2,67E-03	2,67E-03
Загальне споживання (А)				2,68E-03

Основним споживачем є оперативна пам'ять, а вона досить енергоефективна, тому струм, що споживається дуже низький.

Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму для 1,2 В всього крім HPS

З креслень були обрані елементи тільки ті, що вживають 1,2 В. Ці дані наведені у таблиця И.7.

Таблиця И.7 – Розрахунок вживаного струму для 1,2 В всі крім HPS

Елемент	Позначення на схемі	Кількість	Струм споживання одиниці(А)	Загальний струм споживання(А)
74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	DD3, DD12, DD21, DD33	4	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$
KSZ9031RNX2R Microchip	DD2	1	0,5	0,5
Загальне споживання (А)				0,5

Розрахунок мінімальної ширини провідника живлення 1,2 В.

Розрахунок у формулі (И.3).

$$b_{min1} = \frac{0,5}{100 * 0,035 + 60 * 0,0615} = 0,07(\text{мм}) \quad (\text{И.3})$$

Звідси маємо, що за ГОСТом мінімальна ширина провідника при мінімальній щільності струму дорівнює 0,07 мм. При максимальній щільності струму – 0.04 мм. Це дуже мало, звичайно умова виконується, так як на платі мінімальна ширина провідника живлення напругою 1,2 В складає 0,3 мм.

За IPC-2221A ширина провідників для відповідного струму в залежності від температури наведені у таблиця И.8.

Таблиця И.8 – Ширина провідників 1,2В живлення від температури за IPC-2221A всі крім HPS

Температура	Ширина зовнішнього провідника (мм)	Ширина внутрішнього провідника (мм)
10	0,11	0,33
20	0,09	0,2
30	0,06	0,15
45	0,04	0,11
60	0,04	
75	0,03	
100	0,02	

Дані збігаються з розрахунками за ГОСТом, тому цей пристрій поки задовольняє умовам роботи при низьких температурах⁸. Розрахунки збігаються з тими розрахунками, які використовувалися при створенні друкованої плати.

Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму для 1,2 В для HPS

З креслень були обрані елементи тільки ті, що вживають 1,2 В. Ці дані наведені у таблиця И.9.

⁸ Низькою температурою вважати температури більше 0°C.

Таблиця И.9 – Розрахунок вживаного струму для 1,2 В HPS

Елемент	Позначення на схемі	Кількість	Струм споживання одиниці(А)	Загальний струм споживання(А)
5CSEBA6U23I7 Intel	DD1	1	$9,4 \cdot 10^{-1}$	$9,4 \cdot 10^{-1}$

Розрахунок мінімальної ширини провідника живлення 1,2 В.

Розрахунок у формулі (И.4).

$$b_{min1} = \frac{0,94}{100 * 0,035 + 60 * 0,0615} = 0,13(\text{мм}) \quad (\text{И.4})$$

Звідси маємо, що за ГОСТом мінімальна ширина провідника при мінімальній щільності струму дорівнює 0,13 мм. При максимальній щільності струму – 0.06 мм. Це дуже мало, звичайно умова виконується, так як на платі мінімальна ширина провідника живлення напругою 1,2 В складає 0,3 мм.

За IPC-2221A ширина провідників для відповідного струму в залежності від температури наведені у таблиця И.10.

Таблиця И.10 – Ширина провідників 1,2В живлення від температури за IPC-2221A HPS

Температура	Ширина зовнішнього провідника (мм)	Ширина внутрішнього провідника (мм)
10	0,33	0,83
20	0,22	0,55
30	0,15	0,41
45	0,13	0,35
60	0,11	
75	0,09	
100	0,06	

ДОДАТОК К

Розрахунок номінального діаметра контактної отвору

Роз'єм 2-406549-1 TE Connectivity AMP Connectors, на платі XS2

Параметри роз'єму взяті з документації. [36] У нього три різних розміри для отворів. Розгляд кожного з них наведено нижче.

Інформаційний.

Оскільки у цього контакту прямокутний вид, то треба розрахувати діагональ. Лінійні розміри такі: 0,51 мм х 0,51 мм.

То діагональ буде дорівнювати: $d_{\text{ве}} = 0,72$ (мм).

Розрахунок наведено в (К.1).

$$d = 0,72 + 0,1 + 0,15 = 0,92 \text{ (мм)} \quad (\text{К.1})$$

Висновок: у схемі використано діаметр 0,9 мм. Дані взяті з документації на елемент [36].

Кріплення 1.

Оскільки у цього контакту прямокутний вид, то треба знайти діагональ. Лінійні розміри такі: 1,27 мм х 0,2 мм.

То діагональ буде дорівнювати: $d_{\text{ве}} = 1,28$ (мм).

Розрахунок наведено в (К.2).

$$d = 1,28 + 0,1 + 0,15 = 1,48 \text{ (мм)} \quad (\text{К.2})$$

Висновок: у схемі використано діаметр 1,57 мм. Дані взяті з документації на елемент [36].

Кріплення 2.

Контакт має дуже складну форму, яка взята з документації і наведена на (рисунок Д.1). Тому буде взято розміри з документації



Рисунок Д.1 – Вивід кріплення елементу 2-406549-1

					ДК61.416123.001ПЗ	119
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок: у схемі використано діаметр 3,25 мм. Дані взяті з документації на елемент [36].

Роз'єм MUSBB15134 Amphenol ICC (Commercial Products), на платі XS4

Параметри роз'єму взяті з документації [37].

Так як у цього елемента прямокутний контакт, то треба знайти діагональ. Лінійні розміри такі: 0,4 мм х 0,25 мм.

$$d_{\text{ве}} = 0,472 \text{ (мм)}.$$

Розрахунок наведено в (К.3).

$$d = 0,472 + 0,1 + 0,15 = 0,672 \text{ (мм)}$$

Висновок: у схемі використано діаметр 0,7 мм. Це (К.3) задовольняє розрахункам.

У цього роз'єму є ще один контакт з іншими розмірами

Так як у цього елемента прямокутний контакт, то треба знайти діагональ. Лінійні розміри такі: 2,5 мм х 0,7 мм.

$$d_{\text{ве}} = 2,59 \text{ (мм)}.$$

Розрахунок наведено в (К.4).

$$d = 2,59 + 0,1 + 0,15 = 2,796 \text{ (мм)}$$

Висновок: у схемі використано діаметр 3,2 мм. Це (К.4) задовольняє розрахункам.

Роз'єм 0901303108 Molex, на платі XP1, XP2, XP3, XP4, XP5

Параметри роз'єму взяті з документації [38].

$$d_{\text{ве}} = 1,0 \text{ (мм)}.$$

Розрахунок наведено в (К.5).

$$d = 1,0 + 0,1 + 0,15 = 0,9 \text{ (мм)} \quad (\text{К.5})$$

Висновок: у схемі використано діаметр 1,0 мм. Це задовольняє розрахункам.

Роз'єм BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd, на платі XS5, XS6, XS7, XS8

Параметри роз'єму взяті з документації [38].

					ДК61416123.001ПЗ	120
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d_{\text{ве}} = 1,8 \text{ (мм)}.$$

Розрахунок наведено в (К.6).

$$d = 1,8 + 0,1 + 0,15 = 2 \text{ (мм)} \quad (\text{К.6})$$

Висновок: у схемі використано діаметр 2,2 мм. Це задовольняє розрахункам.

Роз'єм BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd, на платі XS9

Параметри роз'єму взяті з документації [39].

Так як у цього елемента прямокутний контакт, то треба знайти діагональ.

Лінійні розміри такі: 1 x 0,4 мм.

$$d_{\text{ве}} = 1,077 \text{ (мм)}$$

Розрахунок наведено в (К.7).

$$d = 1,077 + 0,1 + 0,15 = 1,3 \text{ (мм)} \quad (\text{К.7})$$

Висновок: у схемі використано діаметр 1,5 мм. Це задовольняє розрахункам.

					ДК61.416123.001ПЗ	121
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Л

Розрахунок діаметра контактної площадки

Граничні відхилення діаметру монтажних отворів визначається з таблиці Л.1

Таблиця Л.1 – Граничне відхилення діаметру монтажних отворів і перехідних отворів

Діаметр отвору d , мм	Наявність металізації	Граничне відхилення діаметру Δd , мм, для класу точності				
		1	2	3	4	5
До 1,0	Без металізації	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$
	З метал. без оплавл.	$+0,05$ $-0,15$	$+0,05$ $-0,15$	$+0$ $-0,10$	$+0$ $-0,10$	$+0$ $-0,075$
	З метал. і с оплавл.	$+0,05$ $-0,18$	$+0,05$ $-0,18$	$+0$ $-0,13$	$+0$ $-0,13$	$+0$ $-0,13$
Від 1,0	Без металізації	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$
	З метал. без оплавл.	$+0,10$ $-0,20$	$+0,10$ $-0,20$	$+0,05$ $-0,15$	$+0,05$ $-0,15$	$+0,05$ $-0,15$
	З метал. і с оплавл.	$+0,10$ $-0,23$	$+0,10$ $-0,23$	$+0,05$ $-0,18$	$+0,05$ $-0,18$	$+0,05$ $-0,18$

З таблиці вище будуть використовуватися рядки з металізацією і без оплавлення, тому що запланована така технологія виробництва для п'ятого класу точності.

Також необхідні значення максимального відхилення ширини друкованого провідника і контактної площадки. Ці дані наведені у таблиця Л.2.

Таблиця Л.2 – Граничне відхилення ширини друкованого провідника і контактної площадки

Наявність металізації	Δt , мм, для класу точності				
	1	2	3	4	5
Без покриття	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$	$+0$ $-0,03$
З покриттям	$+0,25$ $-0,20$	$+0,15$ $-0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$

Значення позиційного допуску розташування центрів контактних майданчиків приведено у таблиця Л.3.

Таблиця Л.3 – Значення позиційного допуску розташування центрів контактний майданчиків

Шар	Розміри друкованої плати по більшій стороні, мм	Значення позиційного допуску розташування центру контактного майданчику T_D , мм, для класу точності				
		1	2	3	4	5
Зовнішній	До 180 включно	0,35	0,25	0,15	0,10	0,05
	Від 180 до 360 включно	0,40	0,30	0,20	0,15	0,08
	Від 360	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
Внутрішній	До 180 включно	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10
	Від 180 до 360 включно	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
	Від 360	0,50	0,40	0,30	0,25	0,20

ДОДАТОК М

Основні параметри класу точності

Таблиця М.1 – Найменування значень основних параметрів класу
точності

Умовні позначення	Найменування значень основних параметрів класу точності				
	1	2	3	4	5
Ширина друкованого провідника, мм	0,75 (29,5)	0,45 (17,7)	0,25 (9,84)	0,15 (5,9)	0,1 (3,937)
Відстань між краями сусідніх елементів, мм	0,75 (29,5)	0,45 (17,7)	0,25 (9,84)	0,15 (5,9)	0,1 (3,937)
Гарантований поясок, мм	0,3 (11,81)	0,2 (7,874)	0,1 (3,937)	0,05 (1,97)	0,025 (0,984)
Відношення ном. значення діаметра найменшого з металізованих отворів, до товщини ДП, мм	0,04/0,6 (23,6)	0,04/0,6 (23,6)	0,33/0,495 (19,5)	0,25/0,375 (14,76)	0,2/0,3 (11,8)

ДОДАТОК Н

Шари друкованої плати

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
	Top Solder	SM-001	Solder Mask		0,025mm	4,6	0,03
	Top Surface Fini...	PbSn	Copper plating		0,02mm		
1	Top Layer	CF-004	Signal	1oz	0,04mm		
	Dielectric 1	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
2	Int1 (GND)	CF-004	Plane	1oz	0,035mm		
	Dielectric 3	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
3	Int2 (VCC3P3_1P5)	CF-004	Signal	1oz	0,036mm		
	Dielectric 4	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
4	Int3 (Sign)	CF-004	Signal	1oz	0,036mm		
	Dielectric 6	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
5	Int4 (Sign)	CF-004	Signal	1oz	0,036mm		
	Dielectric 2	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
6	Int5 (GND)	CF-004	Plane	1oz	0,035mm		
	Dielectric 13	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
7	Int6 (Sign)	CF-004	Signal	1oz	0,035mm		
	Dielectric 10	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
8	Int7 (Sign)	CF-004	Signal	1oz	0,035mm		
	Dielectric 8	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
9	Int8 (GND)	CF-004	Plane	1oz	0,035mm		
	Dielectric 5	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
10	Int9 (Sign)	CF-004	Signal	1oz	0,036mm		
	Dielectric 9	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
11	Int10 (Sign)	CF-004	Signal	1oz	0,036mm		
	Dielectric 11	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
12	Int11 (VCC)	CF-004	Signal	1oz	0,036mm		
	Dielectric 12	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
13	Int12 (GND)	CF-004	Plane	1oz	0,036mm		
	Dielectric 14	FR-4 TML170	Prepreg		0,11mm	4,6	0,015
14	Bottom Layer 1	CF-004	Signal	1oz	0,04mm		
	Bottom Surface...	PbSn	Copper plating		0,02mm		
	Bottom Solder	SM-001	Solder Mask		0,025mm	4,6	0,03

Рисунок Н.1 – Розташування шарів друкованої плати

ДОДАТОК П

Технологічний процес виготовлення друкованої плати

Схема технологічного виготовлення друкованої багатошарової плати по технології метода пошарового нарощування продемонстрована на (рисунок П.1). [61]

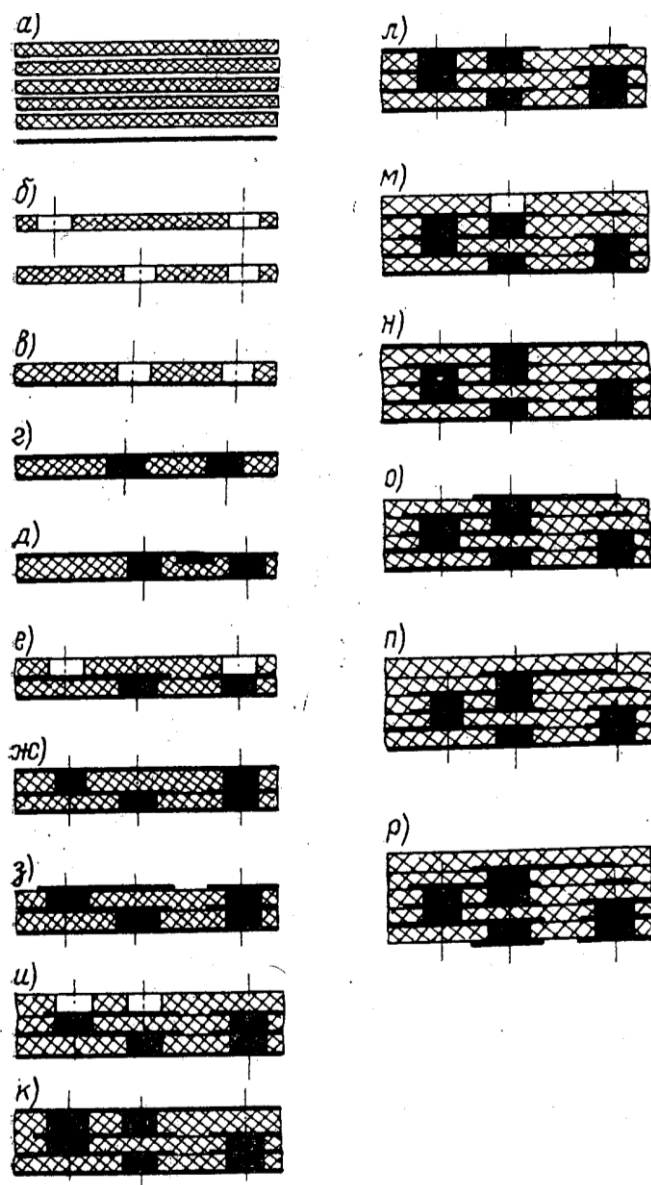


Рисунок П.1 – Схема технологічного процесу методу пошарового нарощування

Відповідно до схеми основними етапами процесу є:

а) виготовлення заготовок склотканини і фольги;

- б) виготовлення діелектрика пресуванням склотканини, нанесення клею на поверхню діелектрика, перфорування діелектрика;
- в) напресовання 1-го шару перфорованого діелектрика на фольгу;
- г) виконання контактних переходів, хімічне і гальванічне міднення поверхні діелектрика;
- д) отримання малюнка схеми 2-го шару МПП, травлення міді з пробільних місць, видалення захисного шару малюнка схеми;
- е) напресовання 2-го шару перфорованого діелектрика;
- ж) виконання контактних переходів, хімічне і гальванічне міднення поверхні;
- з) отримання малюнка 3-го шару МПП, травлення міді з пробільних місць, видалення захисного шару малюнка схеми;
- и) напресовання 3-го шару перфорованого діелектрика;
- к) виконання контактних переходів, хімічне і гальванічне міднення поверхні діелектрика;
- л) отримання малюнка 4-го шару МПП, травлення міді з пробільних місць, видалення захисного шару малюнка схеми;
- м) напресовання 4-го шару перфорованого діелектрика;
- н) виконання контактних переходів, хімічне і гальванічне міднення поверхні діелектрика;
- о) отримання малюнка 5-го шару МПП, травлення міді з пробільних місць, видалення захисного шару малюнка схеми;
- п) напресовання останнього шару діелектрика, збірка пакета;
- р) отримання малюнка схеми зовнішнього шару, нанесення захисного шару малюнка схеми, травлення міді з пробільних місць, освітлення захисного металевого покриття, механічна обробка МПП, маркування, контроль, нанесення технологічного захисного покриття, упаковка.

ДОДАТОК Р

Трасування друкованої плати

Результат трасування оперативної пам'яті наведено (рисунок Р.1).

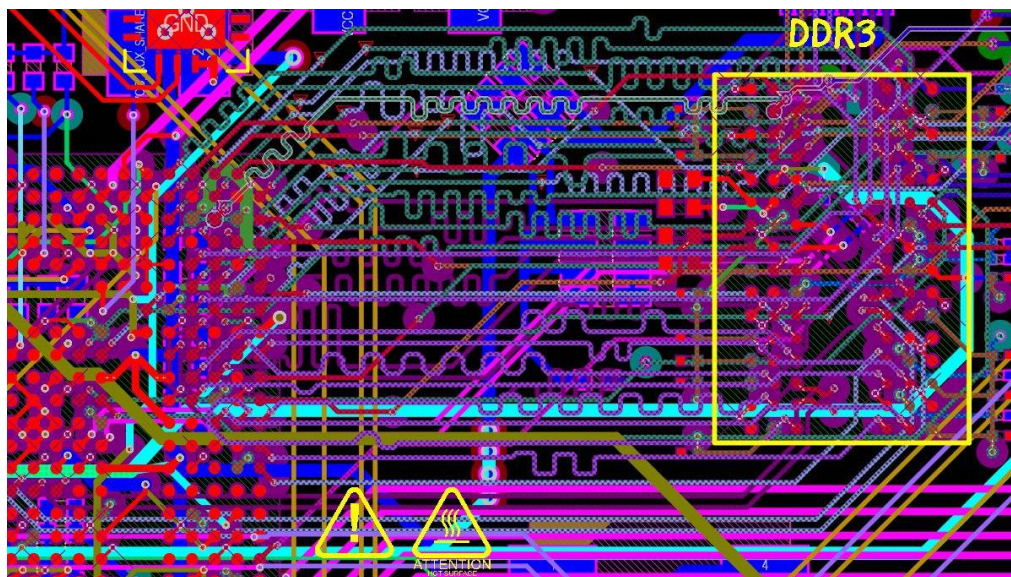


Рисунок Р.1 – Трасування оперативної пам'яті

На рисунку бачимо багато провідників, і деякі з них виглядають як змійка, це зроблено за вимогами і правилами трасування оперативної пам'яті, так як довжина провідників повинна бути однакова.

На (рисунок Р.2) наведено трасовану частину з АЦП.

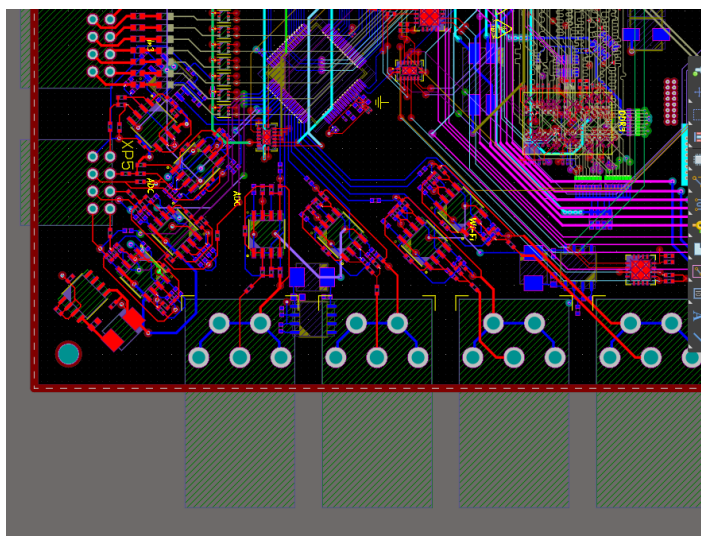


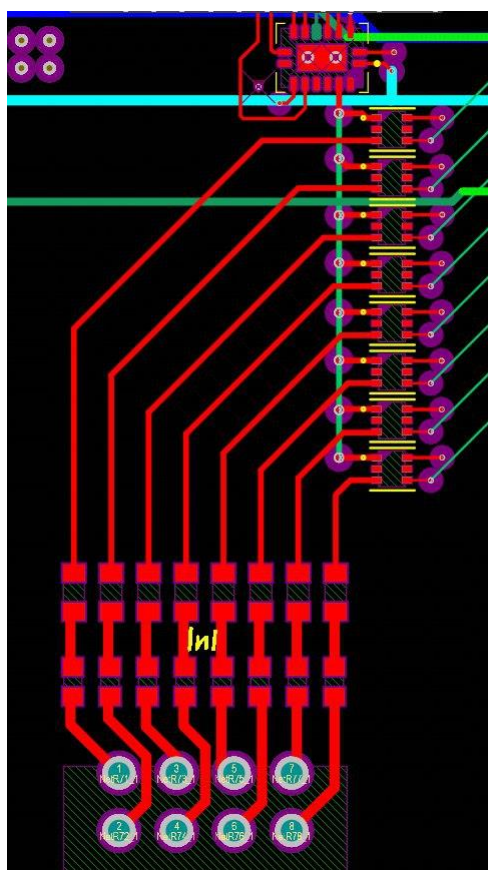
Рисунок Р.2 – Трасування АЦП

З (рисунок Р.2) видно, що трасування виконується максимально у один шар. Є перехідні отвори на інші шари, але на рисунку відключені полігони, тому він нікуди не йде. Сизий провідник з великою шириною – опорна напруга для АЦП, він йде на інший вхід.

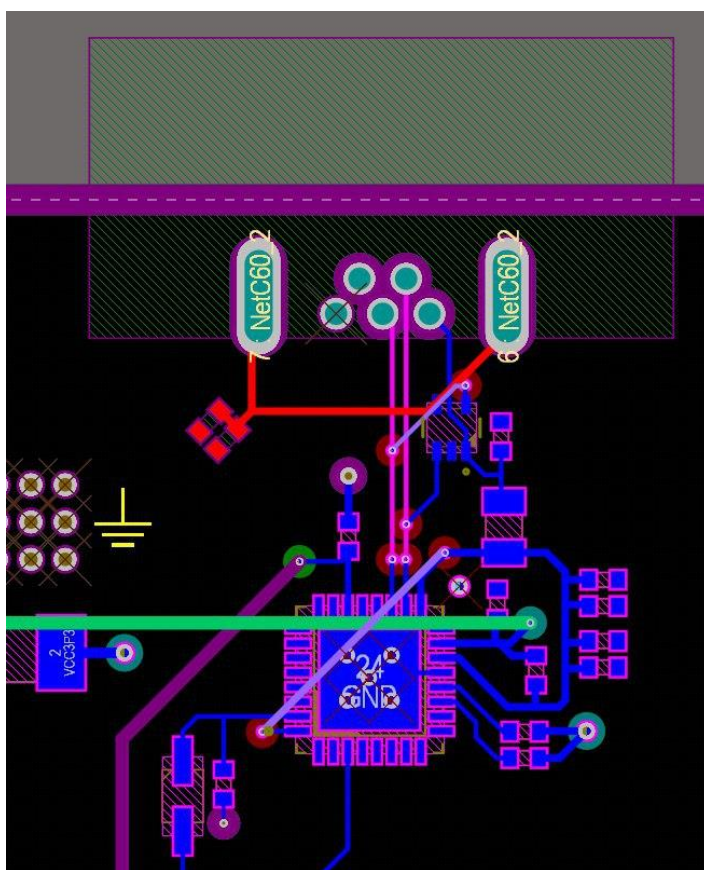
На (рисунок Р.3) наведено трасування вхідних сигналів а) і USB виходу, на ньому присутній диференційний провідник б).

На (рисунок Р.3) а) зображено вхідний цифровий сигнал, провідники йдуть на рівній відстані один від одного, це зроблено для зменшення ємності. Провідники шириною 0,3 мм – зменшення опору і втрат, при низьких напругах це більш важливо. Також трасування здійснено на зовнішньому шарі, це мікрополоскова лінія, зроблено для зменшення імпедансу.

Схема живлення наведена на (рисунок Р.3).



а)



б)

Рисунок Р.3 – Трасування друкованої плати

а) вхідний цифровий сигнал

б) вихідний сигнал USB

На (рисунок Р.4) нагорі – вхід живлення схеми. На схему заходить 5 В постійної напруги.

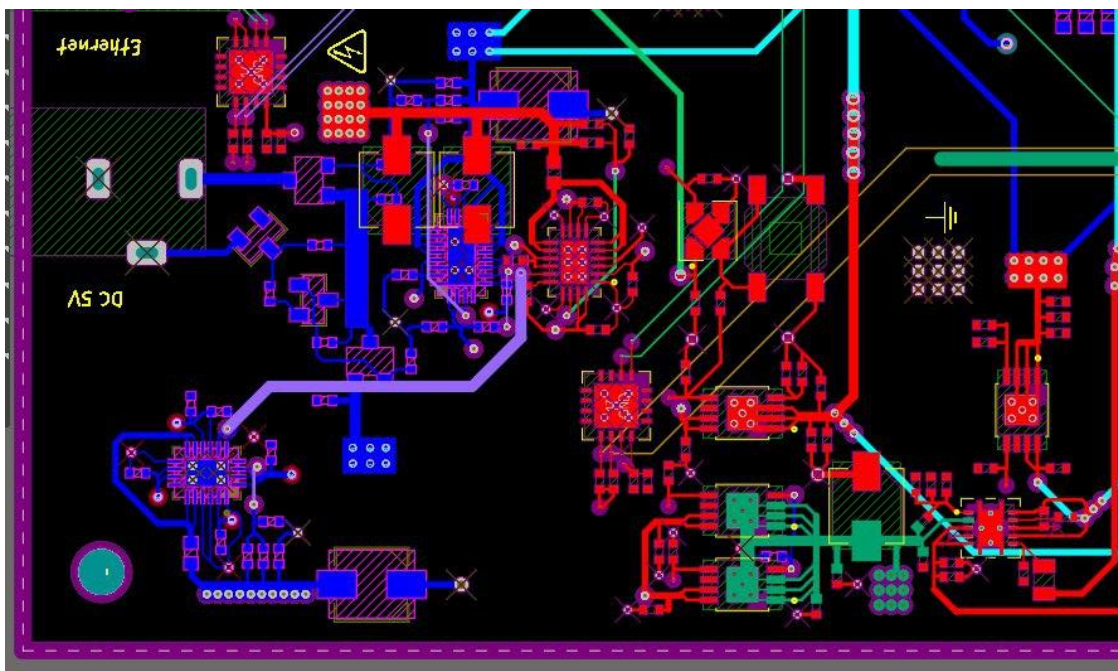


Рисунок Р.4 – Трасування схеми живлення

На рисунку розташовані схеми перетворення напруги відповідно до розділу 2.2 схема живлення приладу.

Найскладніша частина – SOC, так як відстань між центрами його виходів дорівнює 0,8 мм, а діаметр кожної його кульки – 0,22 мм, що у свою чергу дорівнює 0,36 мм, а це робить майже неможливим проведення проміж них провіднику. Тому кожній кульці відповідає свій перехідний отвір (рисунок Р.5).

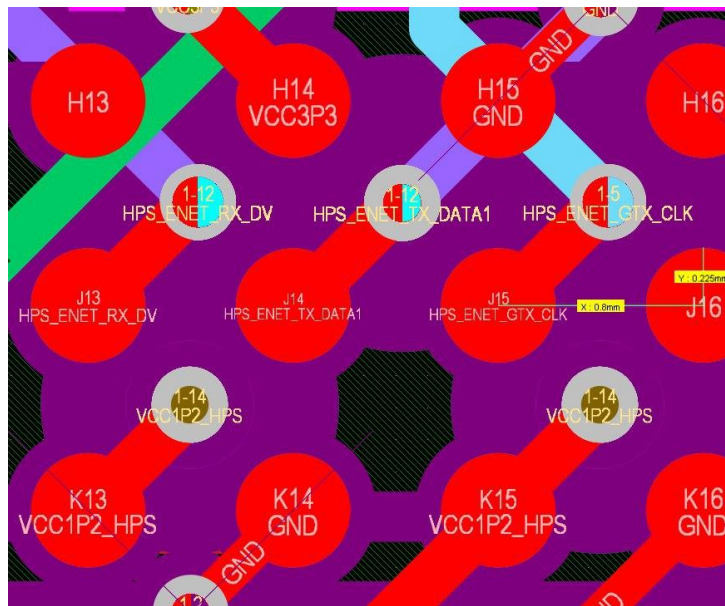


Рисунок Р.5 – Трасування SOC збільшена частина

Загальний вид SOC після трасування наведено на (рисунок Р.6).

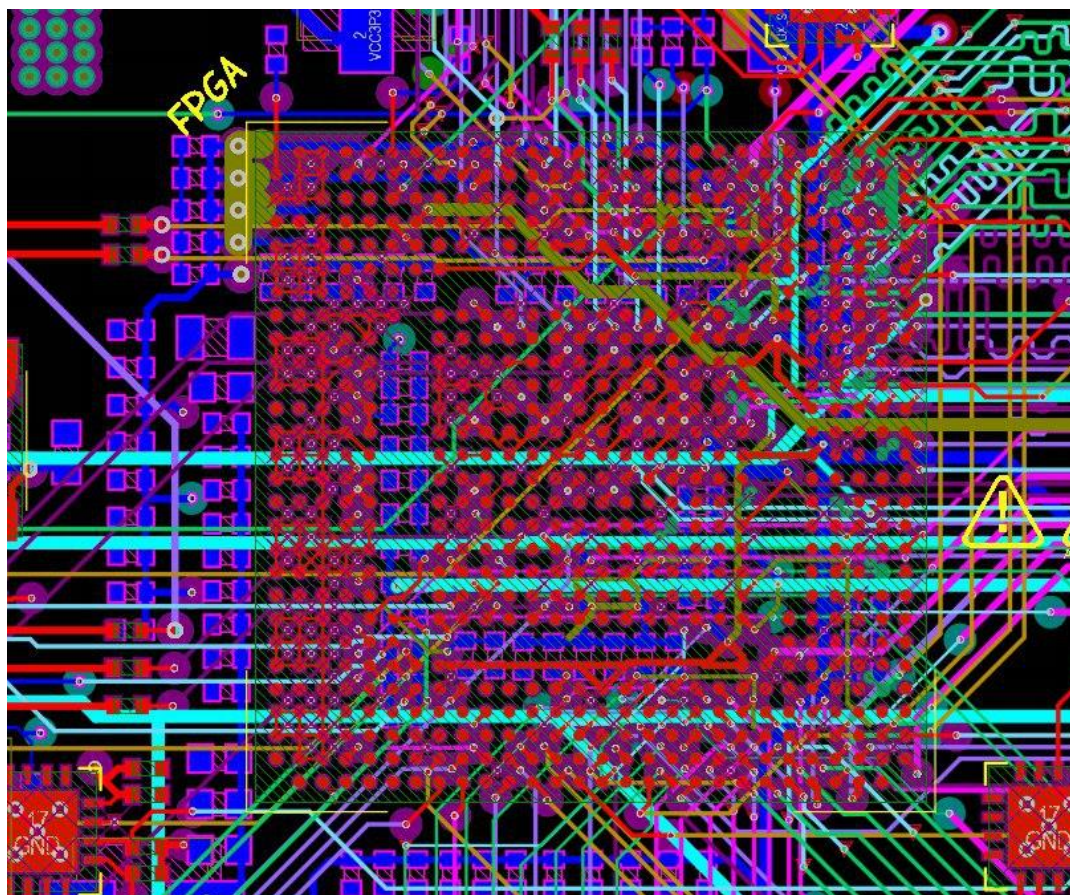


Рисунок Р.6 – Трасування SOC

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДК6.14.16.123.001ПЗ

ДОДАТОК С

Розрахунок ємності між шарами ДП

Ємність між шаром 1 і шаром 2.

Площа металізації згідно з гербер-файлом друкованої плати шару 1 дорівнює: 16774,16 мм², а шару 2 – 18166,36 мм². Товщина друкованої плати між шарами однакова і дорівнює 0,11 мм. Розрахунок наведено у (5.5).

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (17140,12 + 18166,36)}{0,11} = 12421,46 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.1})$$

Ємність між шаром 2 і шаром 3.

Площа металізації шару 2 – 18166,36 мм², а шару 3 – 17979,53 мм². (C.2)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (18166,36 + 17979,53)}{0,11} = 12716,78 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.2})$$

Ємність між шаром 3 і шаром 4.

Площа металізації шару 3 – 17979,53 мм², а шару 4 – 17595,09 мм². (с.3)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (17979,53 + 17595,09)}{0,11} = 12515,80 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.3})$$

Ємність між шаром 4 і шаром 5.

Площа металізації шару 4 – 17595,09 мм², а шару 5 – 17767,46 мм². (C.4)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (17595,09 + 17767,46)}{0,11} = 12441,18 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.4})$$

Ємність між шаром 5 і шаром 6.

Площа металізації шару 5 – 17767,46 мм², а шару 6 – 18264,56 мм². (C.5)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (17767,46 + 18264,56)}{0,11} = 12676,72 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.5})$$

Ємність між шаром 6 і шаром 7.

Площа металізації шару 6 – 18264,56 мм², а шару 7 – 17963,31 мм². (C.6)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (18264,56 + 17963,31)}{0,11} = 12745,62 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.6})$$

Ємність між шаром 7 і шаром 8.

Площа металізації шару 7 – 17963,31 мм², а шару 8 – 17894,11 мм². (C.7)

					ДК61.416123.001ПЗ	132
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (17963,31 + 17894,11)}{0,11} = 12615,29 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.7})$$

Ємність між шаром 8 і шаром 9.

Площа металізації шару 8 – 17894,11 мм², а шару 9 – 18286,05 мм². (C.8)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (17894,11 + 18286,05)}{0,11} = 12728,84 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.8})$$

Ємність між шаром 9 і шаром 10.

Площа металізації шару 9 – 18286,05 мм², а шару 10 – 17698,30 мм². (C.9)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (18286,05 + 17698,30)}{0,11} = 12659,95 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.9})$$

Ємність між шаром 10 і шаром 11.

Площа металізації шару 10 – 17698,30 мм², а шару 11 – 17661,28 мм².

(C.10)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (17698,30 + 17661,28)}{0,11} = 12440,14 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.10})$$

Ємність між шаром 11 і шаром 12.

Площа металізації шару 11 – 17661,28 мм², а шару 12 – 17979,53 мм².

(C.11)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (17661,28 + 17979,53)}{0,11} = 12429,02 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.11})$$

Ємність між шаром 12 і шаром 13.

Площа металізації шару 12 – 17979,53 мм², а шару 13 – 18300,26 мм².

(C.12)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (17979,53 + 18300,26)}{0,11} = 12653,82 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.12})$$

Ємність між шаром 13 і шаром 14.

Площа металізації шару 13 – 18300,26 мм², а шару 14 – 17268,37 мм².

(C.13)

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,3 \cdot (18300,26 + 17268,37)}{0,11} = 12513,69 \text{ (нФ)} \quad (\text{C.13})$$

ДОДАТОК Т

Розрахунок інтенсивності відмов приладу

Розрахунок для 20 градусів.

Резистори. Дані наведені в таблиця Т.1.

Таблиця Т.1 – Розрахунок інтенсивності відмов резисторів

Ім'я	Позначення на платі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_P	π_S	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
R-0402 0,1 Вт 2 кОм 5% Yageo	R1, R213, R215	3	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,081
R-0603 0,1 Вт 100 Ом 5% Yageo	R2, R3	2	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,054
R-0402 0,1 Вт 220 Ом 5% Yageo	R4, R5, R69, R70	4	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,108
R-0402 0,1 Вт 4,7 кОм 5% Yageo	R6, R7, R34, R35, R106	5	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,135
CAY16-510J8LF 0,06 Вт 51 Ом 5% Bourns Inc,	R8, R10, R11	3	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,081
R-0402 0,1 Вт 51 Ом 5% Yageo	R9	1	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,027
R-0402 0,1 Вт 0 Ом 5% Yageo	R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21	10	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,269
R-0402 0,1 Вт 4,7 кОм 5% Yageo	R22, R23	2	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,054

Продовження таблиці Т.1

Ім'я	Позначення на платі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_P	π_S	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	R24, R25, R95, R101, R104, R105, R113, R114, R115, R116, R117, R118, R119, R120, R121, R122, R194, R208	18	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,485
R-0402 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	R26, R30, R31, R110, R111, R212	6	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,162
R-0402 0,1 Вт 18,2 Ом 5% Yageo	R27, R28, R29, R32, R33	5	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,135
R-0201 0,1 Вт 4,7 кОм 5% Yageo	R36, R37, R38, R39, R40, R41, R42, R43, R44, R45, R46, R47, R48, R49, R50, R51, R52, R53, R54, R55, R56	21	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,565
R-0201 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	R57, R58, R59	3	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,081
R-0402 0,1 Вт 49,9 Ом 5% Yageo	R60, R62, R63, R64, R65, R66, R67, R68	8	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,215
R-0402 0,1 Вт 12,1 кОм 5% Yageo	R61	1	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,027
R-0603 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	R71, R72, R73, R74, R75, R76, R77, R78, R79, R80, R81, R82, R83, R84, R85, R86, R87, R88, R89, R90, R91, R92, R93, R94	24	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,646

Продовження таблиці Т.1

Ім'я	Позначення на платі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_P	π_S	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
R-0201 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	R96, R97, R98, R99, R100	5	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,135
R-0402 0,1 Вт 120 Ом 5% Yageo	R102, R103	2	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,054
R-0402 0,1 Вт 1 МОм 5% Yageo	R107	1	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,027
R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	R108, R109, R112, R191, R192, R193, R199, R207, R209, R211	10	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,269
R-0402 0,1 Вт 10,5 кОм 0,5% Yageo	R123, R124, R125, R126, R155, R156, R157, R158	8	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,215
R-0402 0,1 Вт 16 кОм 0,5% Yageo	R127, R128, R129, R130, R159, R160, R161, R162	8	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,215
R-0402 0,1 Вт 2,15 кОм 0,5% Yageo	R131, R132, R133, R134, R163, R164, R165, R166	8	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,215
R-0402 0,1 Вт 2,49 кОм 0,5% Yageo	R135, R136, R137, R138, R167, R168, R169, R170	8	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,215
R-0402 0,1 Вт 604 Ом 0,5% Yageo	R139, R140, R141, R142, R171, R172, R173, R174	8	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,215
R-0402 0,1 Вт 866 Ом 0,5% Yageo	R143, R144, R145, R146, R175, R176, R177, R178	8	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,215

Продовження таблиці Т.1

Ім'я	Позначення на платі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_P	π_S	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
R-0402 0,1 Вт 162 Ом 0,5% Yageo	R147, R148, R149, R150, R179, R180, R181, R182	8	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,215
R-0402 0,1 Вт 210 Ом 0,5% Yageo	R151, R152, R153, R154, R183, R184, R185, R186	8	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,215
R-0402 0,1 Вт 100 Ом 5% Yageo	R187, R188, R189, R190	4	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,108
R-0402 0,1 Вт 30 кОм 5% Yageo	R195, R196	2	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,054
R-0402 0,1 Вт 330 Ом 5% Yageo	R197	1	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,027
R-0402 0,1 Вт 6,8 кОм 5% Yageo	R198, R200	2	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,054
R-0402 0,1 Вт 150 кОм 5% Yageo	R201	1	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,027
R-0402 0,1 Вт 180 кОм 5% Yageo	R202, R214	2	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,054
R-0402 0,1 Вт 165 кОм 5% Yageo	R203, R205	2	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,054
R-0402 0,1 Вт 36,5 кОм 5% Yageo	R204	1	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,027
R-0402 0,1 Вт 52,3 кОм 5% Yageo	R206	1	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,027
R-0402 0,1 Вт 120 кОм 5% Yageo	R210	1	0,0017	0,88	2,5	1,5	0,3	16	0,027

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.1 є загальна надійність всіх резисторів на платі, що у свою чергу дорівнює **5,79** одиниць за годину.

Конденсатори

Конденсатори на схемі поділяються на електролітичні, для яких за американською специфікацією було обрано коефіцієнти відповідно СНR, для керамічних конденсаторів було обрано стиль – СС.

Таблиця Т.2 – Розрахунок інтенсивності відмов конденсаторів

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_C	π_V	π_{SR}	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
0805 50 В 2,2 нФ 15% Kemet	C1, C3, C5, C6, C8, C9	6	0,00099	0,79	0,54	1	0,66	0,3	20	$1,0 \cdot 10^{-2}$
0805 16 В 100 нФ 15% Kemet	C2, C4, C16, C18, C19	5	0,00099	0,79	0,81	1	0,66	0,3	20	$1,3 \cdot 10^{-2}$
Tape & Reel (TR) 16 В 100 нФ 20% Kemet	C7, C12, C17	3	0,00099	0,79	0,81	1	0,66	0,3	20	$7,5 \cdot 10^{-3}$
0805 50 В 3,3 нФ 15% Kemet	C10	1	0,00099	0,79	0,54	1	0,66	0,3	20	$1,7 \cdot 10^{-3}$
0805 50 В 4,7 нФ 15% Kemet	C11	1	0,00099	0,79	0,54	1	0,66	0,3	20	$1,7 \cdot 10^{-3}$
0805 50 В 10 нФ 15% Kemet	C13, C14, C15	3	0,00099	0,79	0,66	1	0,66	0,3	20	$6,1 \cdot 10^{-3}$
0805 10 В 470 нФ 15% Kemet	C20, C21, C22	3	0,00099	0,79	0,94	1	0,66	0,3	20	$8,7 \cdot 10^{-3}$
0402 16 В 100 нФ 15% Kemet	C23, C288, C295	3	0,00099	0,79	0,81	1	0,66	0,3	20	$7,5 \cdot 10^{-3}$
0603 6,3 В 4 пФ 15% Kemet	C24, C25	2	0,00099	0,79	0,29	2	0,66	0,3	20	$3,6 \cdot 10^{-3}$
0603 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	C26	1	0,00099	0,79	1,1	2	0,66	0,3	20	$6,8 \cdot 10^{-3}$
0603 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	C27, C28, C29	3	0,00099	0,79	0,81	1	0,66	0,3	20	$7,5 \cdot 10^{-3}$
0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	C30	1	0,00099	0,79	1,1	2	0,66	0,3	20	$6,8 \cdot 10^{-3}$

Продовження таблиці Т.2

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_C	π_V	π_{SR}	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
0402 50 В 10 нФ 15% Kemet	C31	1	0.00099	0.79	0.35	1	0.66	0.3	20	1.1·10 ⁻³
0402 50 В 1 нФ 15% Kemet	C32	1	0.00099	0.79	0.29	1	0.66	0.3	20	9.0·10 ⁻⁴
0402 50 В 33 пФ 15% Kemet	C33	1	0.00099	0.79	0.29	1	0.66	0.3	20	9.0·10 ⁻⁴
0402 50 В 0,22 мкФ 15% Kemet	C34, C35, C42, C43, C44	5	0.00099	0.79	0.81	1	0.66	0.3	20	1.3·10 ⁻²
0402 10 В 1 мкФ 15% Kemet	C36, C37, C46, C47, C48, C100, C153	7	0,00099	0,79	1	2	0,66	0,3	20	4,3·10 ⁻²
0402 6,3 В 10 мкФ 15% Kemet	C38, C39, C50, C51, C52	5	0,00099	0,79	0,66	2	0,66	0,3	20	2,0·10 ⁻²
0603 50 В 10 нФ 15% Kemet	C40, C41, C45, C49	4	0,00099	0,79	0,29	1	0,66	0,3	20	3,6·10 ⁻³
0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	C53	1	0,00099	0,79	1,1	2	0,66	0,3	20	6,8·10 ⁻³
0402 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	C54	1	0,00099	0,79	0,81	1,3	0,66	0,3	20	3,3·10 ⁻³
0402 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	C55, C57, C60, C73, C299	5	0,00099	0,79	0,81	1,3	0,66	0,3	20	1,6·10 ⁻²
0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	C56, C58, C103, C149	4	0,00099	0,79	1,1	2	0,66	0,3	20	2,7·10 ⁻²
0402 50 В 0,01 мкФ 15% Kemet	C59	1	0,00099	0,79	0,66	1	0,66	0,3	20	2,0·10 ⁻³

Продовження таблиці Т.2

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , ГОД ⁻¹	π_T	π_C	π_V	π_{SR}	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, ГОД ⁻¹
0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	C61, C65, C69, C74, C78, C81, C84, C87, C90, C99, C105, C111, C112, C116, C122, C125, C131, C134, C135, C139, C140, C143, C157, C159, C160, C161, C162	27	0,00099	0,79	0,66	1,3	0,66	0,3	20	7,2·10 ⁻²
0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	C62, C66, C70, C75, C79, C82, C85, C88, C91, C98, C128, C130, C132, C133, C137, C138, C142, C146, C148, C151, C154	21	0,00099	0,79	0,54	1,3	0,66	0,3	20	4,6·10 ⁻²
0603 16 В 22 нФ 15% Kemet	C63, C67, C71, C76	4	0,00099	0,79	0,66	1,3	0,66	0,3	20	1,1·10 ⁻²
0402 6,3 В 2,2 мкФ 15% Kemet	C64, C68, C72, C77, C80, C83, C101	7	0,00099	0,79	1,1	2	0,66	0,3	20	4,8·10 ⁻²
AHD 6,3 В 100 нФ 10% Kemet	C86, C89	2	0,00051	0,91	0,81	1,4	0,66	0,3	20	4,2·10 ⁻³
0805 6,3 В 10 мкФ 15% Kemet	C92	1	0,00099	0,79	1,2	1,3	0,66	0,3	20	4,8·10 ⁻³
AHD 6,3 В 100 мкФ 10% Kemet	C93, C94, C95, C277, C279, C280, C297	7	0,00051	0,91	1,6	1,4	0,66	0,3	20	2,9·10 ⁻²
AHD 6,3 В 10 мкФ 10% Kemet	C96	1	0,00051	0,91	1,2	1,4	0,66	0,3	20	3,1·10 ⁻³

Продовження таблиці Т.2

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_C	π_V	π_{SR}	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
AHD 2,5 В 330 мкФ 10% Kemet	C97, C276	2	0,00051	0,91	1,6	1,4	0,66	0,3	20	8,2·10 ⁻³
0402 6,3 В 470 нФ 15% Kemet	C102, C107, C109, C150	4	0,00099	0,79	0,94	2	0,66	0,3	20	2,3·10 ⁻²
0402 10 В 10 мкФ 15% Kemet	C104, C261, C262, C263, C264, C265, C266, C267, C268, C269, C270, C271, C272	13	0,00099	0,79	0,66	1,6	0,66	0,3	20	4,3·10 ⁻²
0402 16 В 22 нФ 15% Kemet	C106, C119, C121, C141, C155, C156	6	0,00099	0,79	0,66	1	0,66	0,3	20	1,2·10 ⁻²
0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	C108, C110, C117, C118, C120, C123, C127, C144, C147, C158, C163, C164, C165, C166	14	0,00099	0,79	0,81	2	0,66	0,3	20	7,0·10 ⁻²
0402 10 В 220 нФ 15% Kemet	C113, C115	2	0,00099	0,79	0,81	1,6	0,66	0,3	20	8,0·10 ⁻³
0402 16 В 47 нФ 15% Kemet	C114, C124, C126, C129, C145	5	0,00099	0,79	0,76	1	0,66	0,3	20	1,2·10 ⁻²
0402 10 В 100 нФ 15% Kemet	C136, C152	2	0,00099	0,79	0,81	2	0,66	0,3	20	1,0·10 ⁻²
0402 237 пФ 1% Kemet	C167, C168, C169, C170, C203, C204, C205, C206	8	0,00099	0,79	0,44	2	0,66	0,3	20	2,2·10 ⁻²
0402 15 В 100 пФ 1% Kemet	C171, C172, C173, C174, C207, C208, C209, C210	8	0,00099	0,79	0,44	1	0,66	0,3	20	1,1·10 ⁻²

Продовження таблиці Т.2

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , ГОД ⁻¹	π_T	π_C	π_V	π_{SR}	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, ГОД ⁻¹
0402 1,54 нФ 1% Kemet	C175, C176, C177, C178, C211, C212, C213, C214	8	0,00099	0,79	0,35	1	0,66	0,3	20	$8,7 \cdot 10^{-3}$
0402 100 нФ 1% Kemet	C179, C180, C181, C182, C187, C188, C189, C190, C195, C196, C197, C198, C215, C216, C217, C218, C223, C224, C225, C226, C231, C232, C233, C234	24	0,00099	0,79	0,81	1	0,66	0,3	20	$6,0 \cdot 10^{-2}$
0402 7,5 нФ 1% Kemet	C183, C184, C185, C186, C219, C220, C221, C222	8	0,00099	0,79	0,66	1	0,66	0,3	20	$1,6 \cdot 10^{-2}$
0402 82,5 нФ 1% Kemet	C191, C192, C193, C194, C227, C228, C229, C230	8	0,00099	0,79	0,81	1	0,66	0,3	20	$2,0 \cdot 10^{-2}$
0402 10 мкФ 15% Kemet	C199, C200, C201, C202, C235, C236, C237, C238	8	0,00099	0,79	1,3	1	0,66	0,3	20	$3,2 \cdot 10^{-2}$
0201 15 В 10 мкФ 15% Kemet	C239, C240, C241, C242, C243, C244	6	0,00099	0,79	1,3	1	0,66	0,3	20	$2,4 \cdot 10^{-2}$
0201 15 В 0,1 мкФ 15% Kemet	C245, C246, C247, C248, C249	5	0,00099	0,79	0,81	1	0,66	0,3	20	$1,3 \cdot 10^{-2}$
0402 15 В 1 мкФ 15% Kemet	C250, C251, C252, C285, C286, C287, C290, C291, C292, C303, C304	11	0,00099	0,79	1	1	0,66	0,3	20	$3,4 \cdot 10^{-2}$

Продовження таблиці Т.2

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_C	π_V	π_{SR}	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
0402 15 В 22 мкФ 15% Kemet	C253, C254, C255, C256, C284, C289, C296, C298, C306	9	0,00099	0,79	1,3	1	0,66	0,3	20	$3,6 \cdot 10^{-2}$
0402 15 В 33 мкФ 15% Kemet	C257, C258, C259, C260	4	0,00099	0,79	1,4	1	0,66	0,3	20	$1,7 \cdot 10^{-2}$
0402 15 В 22 пФ 15% Kemet	C273, C274, C275	3	0,00099	0,79	0,44	1	0,66	0,3	20	$4,1 \cdot 10^{-3}$
0402 10 В 47 мкФ 15% Kemet	C278	1	0,00099	0,79	1,4	1	0,66	0,3	20	$4,3 \cdot 10^{-3}$
0402 6,3 В 100 мкФ 15% Kemet	C281, C282	2	0,00099	0,79	1,6	2	0,66	0,3	20	$2,0 \cdot 10^{-2}$
0402 6,3 В 47 мкФ 15% Kemet	C283	1	0,00099	0,79	1,4	2	0,66	0,3	20	$8,7 \cdot 10^{-3}$
0402 15 В 10 нФ 15% Kemet	C293	1	0,00099	0,79	0,35	1	0,66	0,3	20	$1,1 \cdot 10^{-3}$
0402 15 В 4,7 нФ 15% Kemet	C294, C305	2	0,00099	0,79	0,54	1	0,66	0,3	20	$3,3 \cdot 10^{-3}$
0402 15 В 47 мкФ 15% Kemet	C300	1	0,00099	0,79	1,4	1	0,66	0,3	20	$4,3 \cdot 10^{-3}$
0402 15 В 2,2 мкФ 15% Kemet	C301, C307	2	0,00099	0,79	1,1	1	0,66	0,3	20	$6,8 \cdot 10^{-3}$
0402 15 В 100 нФ 15% Kemet	C302	1	0,00099	0,79	0,81	1	0,66	0,3	20	$2,5 \cdot 10^{-3}$

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.2 є загальна надійність всіх конденсаторів на платі, що у свою чергу дорівнює **0,97** одиниць за годину.

Роз'єми

Таблиця Т.3 – Розрахунок інтенсивності відмов роз'ємів

Ім'я	Коментар	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_K	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
0901303108 Molex	IN_DATA	XP1, XP2, XP3, XP4, XP5	5	0.021	0.91	1	2	8	1.52
2-406549-1 TE Connectivity AMP Connectors	RJ45	XS2	1	0.046	0.91	1	2	8	0.67
5031821852 Molex	SD	XS3	1	0.04	0.91	1	2	8	0.58
MUSBB15134 Amphenol ICC (Commercial Products)	Mini USB-B	XS4	1	0.046	0.91	1	2	8	0.67
BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd	Coaxial	XS5, XS6, XS7, XS8	4	0.00041	0.91	1	2	8	0.02
54-00134 Tensility International Corp	POWER	XS9	1	0.007	0.91	1	2	8	0.10

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.3 є загальна надійність всіх роз'ємів на платі, що у свою чергу дорівнює **3,58** одиниць за годину.

Транзистори

Таблиця Т.4 – Розрахунок інтенсивності відмов транзисторів

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_A	π_R	π_S	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
AO3415A Alpha & Omega Semiconductor Inc.	VT1, VT5, VT7	3	0.00074	1	1.5	2.3	0.54	5.5	9	0.205
ESD5V3U2U Infineon Technologies	VT2, VT3, VT4	3	0.00074	1	1.5	2.3	0.54	5.5	9	0.205
HE8550G Unisonic Tech	VT6	1	0.00074	1	1.5	2.3	0.54	5.5	9	0.068

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.4 є загальна надійність всіх транзисторів на платі, що у свою чергу дорівнює **0,48** одиниць за годину.

Діоди

Таблиця Т.5 – Розрахунок інтенсивності відмов діодів

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_S	π_C	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
CZRU52C3V9 Comchip Technology	VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6, VD7, VD8, VD9, VD10, VD11, VD12, VD13, VD14, VD15, VD16, VD17, VD18, VD19, VD20, VD21, VD22, VD23, VD24	24	0.003	1	1	1	8	9	5.184
SD107WS Diodes Incorporated	VD25	1	0.003	1	1	1	8	9	0.216
MBRS130T3G ON Semiconductor	VD26, VD27, VD28, VD29	4	0.003	1	1	1	8	9	0.864
BZX84C5V1LT1G ON Semiconductor	VD30	1	0.003	1	1	1	8	9	0.216
LED 0603 green	HL1, HL2	2	0.003	1	1	1	8	9	0.432

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.5 є загальна надійність всіх діодів на платі, що у свою чергу дорівнює **6,91** одиниць за годину.

Кнопки

Таблиця Т.6 – Розрахунок інтенсивності відмов кнопок

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_L	π_C	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
KLS7- TS6611- 1.5-180 KLS	SB1	1	0.01	1	2	2	18	0.72

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.6 є загальна надійність всіх кнопок на платі, що у свою чергу дорівнює **0,72** одиниць за годину.

Індуктивність

Таблиця Т.7 – Розрахунок інтенсивності відмов індуктивності

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_T	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
SRF0905-472Y Bourns Inc.	L1, L2	2	0.022	0.93	3	12	1.47
LBC2518T471K Taiyo Yuden	L3, L4	2	0.022	0.93	3	12	1.47
ELL-8UV470M Panasonic Electronic Components	L5, L6, L7, L8, L9	5	0.022	0.93	3	12	3.68
LB3218T102K Taiyo Yuden	L10	1	0.022	0.93	3	12	0.74
HI0805R800R-10 Laird-Signal Integrity Products	L11, L19	2	0.022	0.93	3	12	1.47
LQG18HN2N7S00D Murata Electronics	L12, L13, L14, L15, L16, L17, L18	7	0.022	0.93	3	12	5.16

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.7 є загальна надійність всіх індуктивностей на платі, що у свою чергу дорівнює **13,99** одиниць за годину.

Пам'ять

Таблиця Т.8 – Розрахунок інтенсивності відмов пам'яті

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	$\lambda_{\text{сус}}$, год ⁻¹	C_1	C_2	π_T	π_E	π_Q	π_L	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
IS43TR16256A-15HBL ISSI	DS1	1	0.2	0.026	0.01	0.1	4	2	1	0.49
EPCS64 Intel	DS2	1	0.2	0.013	0.0016	0.1	4	2	1	0.42

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.8 є загальна надійність всієї пам'яті на платі, що у свою чергу дорівнює **0,90** одиниць за годину.

Цифрові мікросхеми

Таблиця Т.9 – Розрахунок інтенсивності відмов цифрових мікросхем

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	C_1 , год ⁻¹	C_2 , год ⁻¹	π_T	π_E	π_Q	π_L	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
5CSEBA6U23I7 Intel	DD1	1							0.460181
KSZ9031RNX2R Microchip	DD2	1	0.005	0.0082	0.1	4	2	1	0.0666
74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	DD3, DD12, DD21, DD33	4	0.005	0.0025	0.1	4	2	1	0.084
SN74AXC1T45 DRLR Texas Instrument Team	DD4, DD5, DD6, DD7, DD8, DD9, DD10, DD11, DD13, DD14, DD15, DD16, DD17, DD18, DD19, DD20, DD22, DD23, DD24, DD25, DD26, DD27, DD28, DD29	24	0.005	0.0092	0.1	4	2	1	1.7904
FT232R FTDI	DD30	1	0.005	0.0016	0.1	4	2	1	0.0138
TPD2E001DRLR Texas Instruments	DD31	1	0.005	0.0012	0.1	4	2	1	0.0106

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.9 є загальна надійність всіх цифрових мікросхем на платі, що у свою чергу дорівнює **2,43** одиниць за годину.

Цифро-аналогові мікросхеми

Таблиця Т.10 – Розрахунок інтенсивності відмов цифро-аналогових мікросхем

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	C_1 , год ⁻¹	C_2 , год ⁻¹	π_T	π_E	π_Q	π_L	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
AD7606BSTZ-RL Analog Devices Inc	DA1	1	0.06	0.01	0.1	4	2	1	0.06
LTC3616IUDD# TRPBF Linear Technology/ Analog Devices	DA2	1	0.01	0.0016	0.1	4	2	1	0.01
LTC3612EUDC Linear Technology/ Analog Devices	DA3, DA4	2	0.01	0.0016	0.1	4	2	1	0.01
LT3080EMS8E Linear Technology/ Analog Devices	DA5, DA6, DA7, DA9	4	0.01	0.0016	0.1	4	2	1	0.01
TPS51200DRC R Texas Instruments	DA8	1	0.06	0.0016	0.1	4	2	1	0.06
TPS3831K33 Texas Instruments	DD32	1	0.01	0.0016	0.1	4	2	1	0.01
ATWINC1500-MR210PB Microchip Technology	DD34	1	0.06	0.0016	0.1	4	2	1	0.06
OPA2690ID Texas Instruments	DD35, DD36, DD37, DD38, DD39, DD40, DD41, DD42, DD43, DD44, DD45, DD46, DD47, DD48, DD49, DD50	16	0.01	0.0016	0.1	4	2	1	0.01
LT1111 Linear Technology/ Analog Devices	DD51, DD52, DD53, DD54	4	0.02	0.0016	0.1	4	2	1	0.02

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.10 є загальна надійність всіх цифро-аналогових мікросхем на платі, що у свою чергу дорівнює **0,56** одиниць за годину.

					ДК61.416123.001ПЗ	149
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Датчик

Таблиця Т.11 – Розрахунок інтенсивності відмов датчиків

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_A	π_F	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, я год ⁻¹
ADT7420UCPZ-RL7 Analog Devices Inc	BK1, BK2, BK3, BK4	4	0.0009	1	1	3.4	25	0.306

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.11 є загальна надійність всіх датчиків мікросхем на платі, що у свою чергу дорівнює **0,3** одиниць за годину.

Кварцові резонатори

Таблиця Т.12 – Розрахунок інтенсивності відмов кварцових резонаторів

Ім'я	Позначення на схемі	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_Q	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
ECS-240-10-37Q-AES-TR ECS Inc.	ZQ1	1	0.032	1	10	0.32

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.12 є загальна надійність всіх датчиків мікросхем на платі, що у свою чергу дорівнює **0,32** одиниць за годину.

Інше

У цьому розділі розрахована ймовірність відмови пайки і перехідних отворів.

Таблиця Т.13 – Розрахунок інтенсивності відмов пайки і перехідних отворів

Ім'я	Кількість	λ_b , год ⁻¹	π_E	Загальна вірог. відмови, год ⁻¹
Пайка	2894	0.0000068	7	0.137754
Перехідні отвори	1587	0.000069	7	0.766521

Висновок: результатом розрахунку таблиці Т.13 є загальна надійність всіх пайок і перехідних отворів на платі, що у свою чергу дорівнює **0,9** одиниць за годину.

Інтенсивність відмов позначена: λ_b

У додатку використані коефіцієнти:

π_T – коефіцієнт температурного режиму;

π_P – коефіцієнт навантаження;

π_S – коефіцієнт стресового навантаження *резистору*;

π_E – коефіцієнт режиму роботи (літак, автівка та інше);

π_Q – коефіцієнт якості елементу;

π_V – коефіцієнт стресової напруги *конденсатору*;

π_{SR} – коефіцієнт послідовного опору *конденсатору*;

π_K – коефіцієнт поєднання *роз'єму*;

π_A – коефіцієнт типу роботи *транзистора* (перемикання/підсилення);

π_R – коефіцієнт потужності *транзистору*;

π_C – коефіцієнт конструктивних особливостей;

π_L – коефіцієнт стресової загрузки кнопки/процесору (частота натискань/перемикань, роботи);

$\pi_{сус}$ – коефіцієнт температури від кількості транзисторів.

ДОДАТОК У

Дані маси, ціни, температур елементів ДП

Таблиця У.1 – Дані маси, ціни, температури у елементів друкованої плати

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
Загальні дані		668		0.107804		16704.24	0	70
Конденсатори								
0805 50 В 2,2 нФ 15% Kemet	C1, C3, C5, C6, C8, C9	6	5.50E-06	0.000033	9.09	54.55	-55	200
0805 16 В 100 нФ 15% Kemet	C2, C4, C16, C18, C19	5	5.50E-06	2.75E-05	9.09	45.46	-55	200
Tape & Reel (TR) 16 В 100 нФ 20% Kemet	C7, C12, C17	3	1.23E-05	3.68E-05	2.74	8.23	-55	200
0805 50 В 3,3 нФ 15% Kemet	C10	1	5.50E-06	5.5E-06	9.09	9.09	-55	200
0805 50 В 4,7 нФ 15% Kemet	C11	1	5.50E-06	5.5E-06	9.09	9.09	-55	200
0805 50 В 10 нФ 15% Kemet	C13, C14, C15	3	5.50E-06	1.65E-05	9.09	27.28	-55	200
0805 10 В 470 нФ 15% Kemet	C20, C21, C22	3	5.50E-06	1.65E-05	9.09	27.28	-55	200
0402 16 В 100 нФ 15% Kemet	C23, C288, C295	3	6.50E-07	1.95E-06	4.69	14.08	-55	200
0603 6,3 В 4 пФ 15% Kemet	C24, C25	2	3.06E-06	6.13E-06	0.38	0.76	-55	200
0603 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	C26	1	3.06E-06	3.06E-06	0.38	0.38	-55	200
0603 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	C27, C28, C29	3	3.06E-06	9.19E-06	0.38	1.14	-55	200
0402 6,3 В 4.7 мкФ 15% Kemet	C30	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200
0402 50 В 10 нФ 15% Kemet	C31	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
0402 50 В 1 нФ 15% Kemet	C32	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200
0402 50 В 33 пФ 15% Kemet	C33	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200
0402 50 В 0,22 мкФ 15% Kemet	C34, C35, C42, C43, C44	5	6.50E-07	3.25E-06	4.69	23.46	-55	200
0402 10 В 1 мкФ 15% Kemet	C36, C37, C46, C47, C48, C100, C153	7	6.50E-07	4.55E-06	4.69	32.85	-55	200
0402 6,3 В 10 мкФ 15% Kemet	C38, C39, C50, C51, C52	5	6.50E-07	3.25E-06	4.69	23.46	-55	200
0603 50 В 10 нФ 15% Kemet	C40, C41, C45, C49	4	3.06E-06	1.23E-05	0.38	1.53	-55	200
0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	C53	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200
0402 16 В 0.1 мкФ 15% Kemet	C54	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200
0402 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	C55, C57, C60, C73, C299	5	6.50E-07	3.25E-06	4.69	23.46	-55	200
0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	C56, C58, C103, C149	4	6.50E-07	2.6E-06	4.69	18.77	-55	200
0402 50 В 0,01 мкФ 15% Kemet	C59	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	C61, C65, C69, C74, C78, C81, C84, C87, C90, C99, C105, C111, C112, C116, C122, C125, C131, C134, C135, C139, C140, C143, C157, C159, C160, C161, C162	27	6.50E-07	1.76E-05	4.69	126.71	-55	200
0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	C62, C66, C70, C75, C79, C82, C85, C88, C91, C98, C128, C130, C132, C133, C137, C138, C142, C146, C148, C151, C154	21	6.50E-07	1.37E-05	4.69	98.55	-55	200
0603 16 В 22 нФ 15% Kemet	C63, C67, C71, C76	4	3.06E-06	1.23E-05	0.38	1.53	-55	200
0402 6,3 В 2,2 мкФ 15% Kemet	C64, C68, C72, C77, C80, C83, C101	7	6.50E-07	4.55E-06	4.69	32.85	-55	200
AHD 6,3 В 100 нФ 10% Kemet	C86, C89	2	1.65E-05	0.000033	21.41	42.82	-55	200
0805 6,3 В 10 мкФ 15% Kemet	C92	1	5.50E-06	5.5E-06	9.09	9.09	-55	200
AHD 6,3 В 100 мкФ 10% Kemet	C93, C94, C95, C277, C279, C280, C297	7	1.65E-05	0.000116	21.41	149.88	-55	200
AHD 6,3 В 10 мкФ 10% Kemet	C96	1	1.65E-05	1.65E-05	21.41	21.41	-55	200

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
AHD 2,5 В 330 мкФ 10% Kemet	C97, C276	2	1.65E-05	0.000033	21.41	42.82	-55	200
0402 6,3 В 470 нФ 15% Kemet	C102, C107, C109, C150	4	6.50E-07	2.6E-06	4.69	18.77	-55	200
0402 10 В 10 мкФ 15% Kemet	C104, C261, C262, C263, C264, C265, C266, C267, C268, C269, C270, C271, C272	13	6.50E-07	8.45E-06	4.69	61.01	-55	200
0402 16 В 22 нФ 15% Kemet	C106, C119, C121, C141, C155, C156	6	6.50E-07	3.9E-06	4.69	28.16	-55	200
0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	C108, C110, C117, C118, C120, C123, C127, C144, C147, C158, C163, C164, C165, C166	14	6.50E-07	9.1E-06	4.69	65.70	-55	200
0402 10 В 220 нФ 15% Kemet	C113, C115	2	6.50E-07	1.3E-06	4.69	9.39	-55	200
0402 16 В 47 нФ 15% Kemet	C114, C124, C126, C129, C145	5	6.50E-07	3.25E-06	4.69	23.46	-55	200
0402 10 В 100 нФ 15% Kemet	C136, C152	2	6.50E-07	1.3E-06	4.69	9.39	-55	200
0402 237 пФ 1% Kemet	C167, C168, C169, C170, C203, C204, C205, C206	8	6.50E-07	5.2E-06	8.21	65.70	-55	200
0402 15 В 100 пФ 1% Kemet	C171, C172, C173, C174, C207, C208, C209, C210	8	6.50E-07	5.2E-06	8.21	65.70	-55	200

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
0402 1,54 нФ 1% Kemet	C175, C176, C177, C178, C211, C212, C213, C214	8	6.50E-07	5.2E-06	8.21	65.70	-55	200
0402 100 нФ 1% Kemet	C179, C180, C181, C182, C187, C188, C189, C190, C195, C196, C197, C198, C215, C216, C217, C218, C223, C224, C225, C226, C231, C232, C233, C234	24	6.50E-07	1.56E-05	8.21	197.10	-55	200
0402 7,5 нФ 1% Kemet	C183, C184, C185, C186, C219, C220, C221, C222	8	6.50E-07	5.2E-06	8.21	65.70	-55	200
0402 82,5 нФ 1% Kemet	C191, C192, C193, C194, C227, C228, C229, C230	8	6.50E-07	5.2E-06	8.21	65.70	-55	200
0402 10 мкФ 15% Kemet	C199, C200, C201, C202, C235, C236, C237, C238	8	6.50E-07	5.2E-06	4.69	37.54	-55	200
0201 15 В 10 мкФ 15% Kemet	C239, C240, C241, C242, C243, C244	6	1.70E-07	1.02E-06	4.55	27.28	-55	200
0201 15 В 0,1 мкФ 15% Kemet	C245, C246, C247, C248, C249	5	1.70E-07	8.5E-07	4.55	22.73	-55	200
0402 15 В 1 мкФ 15% Kemet	C250, C251, C252, C285, C286, C287, C290, C291, C292, C303, C304	11	6.50E-07	7.15E-06	4.69	51.62	-55	200

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
0402 15 В 22 мкФ 15% Kemet	C253, C254, C255, C256, C284, C289, C296, C298, C306	9	6.50E-07	5.85E-06	4.69	42.24	-55	200
0402 15 В 33 мкФ 15% Kemet	C257, C258, C259, C260	4	6.50E-07	2.6E-06	4.69	18.77	-55	200
0402 15 В 22 пФ 15% Kemet	C273, C274, C275	3	6.50E-07	1.95E-06	4.69	14.08	-55	200
0402 10 В 47 мкФ 15% Kemet	C278	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200
0402 6,3 В 100 мкФ 15% Kemet	C281, C282	2	6.50E-07	1.3E-06	4.69	9.39	-55	200
0402 6,3 В 47 мкФ 15% Kemet	C283	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200
0402 15 В 10 нФ 15% Kemet	C293	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200
0402 15 В 4,7 нФ 15% Kemet	C294, C305	2	6.50E-07	1.3E-06	4.69	9.39	-55	200
0402 15 В 47 мкФ 15% Kemet	C300	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200
0402 15 В 2,2 мкФ 15% Kemet	C301, C307	2	6.50E-07	1.3E-06	4.69	9.39	-55	200
0402 15 В 100 нФ 15% Kemet	C302	1	6.50E-07	6.5E-07	4.69	4.69	-55	200
Мікросхеми								
AD7606BSTZ-RL Analog Devices Inc	DA1	1	8.00E-04	0.0008	793.10	793.10	-40	85
LTC3616IUDD# TRPBF Linear Technology/ Analog Devices	DA2	1	1.61E-04	0.000161	182.88	182.88	-40	125
LTC3612EUDC Linear Technology/ Analog Devices	DA3, DA4	2	1.60E-04	0.000321	125.53	251.07	-40	125
LT3080EMS8E Linear Technology/ Analog Devices	DA5, DA6, DA7, DA9	4	1.60E-04	0.000642	80.66	322.64	-40	125

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
TPS51200DRCR Texas Instruments	DA8	1	2.61E-05	2.61E-05	9.27	9.27	-40	85
5CSEBA6U23I7 Intel	DD1	1	1.20E-02	0.012	7039.34	7039.34	-40	100
KSZ9031RNX2R Microchip	DD2	1	1.51E-04	0.000151	153.69	153.69	0	70
74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	DD3, DD12, DD21, DD33	4	6.30E-05	0.000252	4.11	16.43	-40	125
SN74AXC1T 45DRLR Texas Instrument Team	DD4, DD5, DD6, DD7, DD8, DD9, DD10, DD11, DD13, DD14, DD15, DD16, DD17, DD18, DD19, DD20, DD22, DD23, DD24, DD25, DD26, DD27, DD28, DD29	24	3.20E-06	7.68E-05	5.87	140.79	-40	125
FT232R FTDI	DD30	1	1.70E-04	0.00017	67.46	67.46	-40	85
TPD2E001DRLR Texas Instruments	DD31	1	2.80E-06	2.8E-06	6.16	6.16	-40	85
TPS3831K33 Texas Instruments	DD32	1	8.00E-07	8E-07	10.56	10.56	-40	85
ATWINC1500- MR210PB Microchip Technology	DD34	1	1.60E-03	0.0016	213.23	213.23	-40	85

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
OPA2690ID Texas Instruments	DD35, DD36, DD37, DD38, DD39, DD40, DD41, DD42, DD43, DD44, DD45, DD46, DD47, DD48, DD49, DD50	16	7.60E-05	0.001216	85.35	1365.63	-40	85
LT1111 Linear Technology/ Analog Devices	DD51, DD52, DD53, DD54	4	1.00E-04	0.0004	122.02	488.06	-40	105
Пам'ять								
IS43TR16256A-15HBL ISSI	DS1	1	1.68E-04	0.000168	161.90	161.90	0	95
EPCS64 Intel	DS2	1	1.70E-04	0.00017	515.05	515.05	-40	85
Світлодіоди								
LED 0603 green	HL1, HL2	2	2.00E-06	0.000004	2.76	5.51	-40	110
Індуктивності								
SRF0905-472Y Bourns Inc.	L1, L2	2	4.61E-04	0.000922	14.96	29.92	-40	105
LBC2518T471K Taiyo Yuden	L3, L4	2	6.50E-05	0.00013	2.26	4.52	-55	125
ELL-8UV470M Panasonic Electronic Components	L5, L6, L7, L8, L9	5	5.00E-05	0.00025	13.75	68.76	-55	125
LB3218T102K Taiyo Yuden	L10	1	4.50E-05	0.000045	4.49	4.49	-55	125
HI0805R800R-10 Laird-Signal Integrity Products	L11, L19	2	5.00E-06	0.00001	2.64	5.28	-55	125

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
LQG18HN2N7S00D Murata Electronics	L12, L13, L14, L15, L16, L17, L18	7	3.90E-05	0.000273	5.81	40.65	-55	125
Резистори								
R-0402 0,1 Вт 2 кОм 5% Yageo	R1, R213, R215	3	1.45E-06	4.35E-06	0.53	1.58	-55	125
R-0603 0,1 Вт 100 Ом 5% Yageo	R2, R3	2	2.50E-05	0.00005	0.65	1.29	-55	125
R-0402 0,1 Вт 220 Ом 5% Yageo	R4, R5, R69, R70	4	1.45E-06	5.8E-06	0.53	2.11	-55	125
R-0402 0,1 Вт 4.7 кОм 5% Yageo	R6, R7, R34, R35, R106	5	1.45E-06	7.25E-06	0.53	2.64	-55	125
CAY16-510J8LF 0,06 Вт 51 Ом 5% Bourns Inc.	R8, R10, R11	3	8.73E-06	2.62E-05	2.05	6.16	-55	125
R-0402 0,1 Вт 51 Ом 5% Yageo	R9	1	1.45E-06	1.45E-06	0.53	0.53	-55	125
R-0402 0,1 Вт 0 Ом 5% Yageo	R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21	10	1.45E-06	1.45E-05	0.53	5.28	-55	125
R-0402 0,1 Вт 4,7 кОм 5% Yageo	R22, R23	2	1.45E-06	2.9E-06	0.53	1.06	-55	125
R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	R24, R25, R95, R101, R104, R105, R113, R114, R115, R116, R117, R118, R119, R120, R121, R122, R194, R208	18	1.45E-06	2.61E-05	0.53	9.50	-55	125
R-0402 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	R26, R30, R31, R110, R111, R212	6	1.45E-06	8.7E-06	0.53	3.17	-55	125

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
R-0402 0,1 Вт 18,2 Ом 5% Yageo	R27, R28, R29, R32, R33	5	1.45E-06	7.25E-06	0.53	2.64	-55	125
R-0201 0,1 Вт 4.7 кОм 5% Yageo	R36, R37, R38, R39, R40, R41, R42, R43, R44, R45, R46, R47, R48, R49, R50, R51, R52, R53, R54, R55, R56	21	1.39E-06	2.93E-05	1.55	32.64	-55	125
R-0201 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	R57, R58, R59	3	1.39E-06	4.18E-06	1.55	4.66	-55	125
R-0402 0,1 Вт 49.9 Ом 5% Yageo	R60, R62, R63, R64, R65, R66, R67, R68	8	1.45E-06	1.16E-05	0.53	4.22	-55	125
R-0402 0,1 Вт 12,1 кОм 5% Yageo	R61	1	1.45E-06	1.45E-06	0.53	0.53	-55	125
R-0603 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	R71, R72, R73, R74, R75, R76, R77, R78, R79, R80, R81, R82, R83, R84, R85, R86, R87, R88, R89, R90, R91, R92, R93, R94	24	2.50E-05	0.0006	0.65	15.49	-55	125
R-0201 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	R96, R97, R98, R99, R100	5	1.39E-06	6.97E-06	1.55	7.77	-55	125
R-0402 0,1 Вт 120 Ом 5% Yageo	R102, R103	2	1.45E-06	2.9E-06	0.53	1.06	-55	125

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
R-0402 0,1 Вт 1 МОм 5% Yageo	R107	1	1.45E-06	1.45E-06	0.53	0.53	-55	125
R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	R108, R109, R112, R191, R192, R193, R199, R207, R209, R211	10	1.45E-06	1.45E-05	0.53	5.28	-55	125
R-0402 0,1 Вт 10,5 кОм 0,5% Yageo	R123, R124, R125, R126, R155, R156, R157, R158	8	8.00E-07	6.4E-06	0.44	3.52	-55	125
R-0402 0,1 Вт 16 кОм 0,5% Yageo	R127, R128, R129, R130, R159, R160, R161, R162	8	8.00E-07	6.4E-06	0.44	3.52	-55	125
R-0402 0,1 Вт 2,15 кОм 0,5% Yageo	R131, R132, R133, R134, R163, R164, R165, R166	8	8.00E-07	6.4E-06	0.44	3.52	-55	125
R-0402 0,1 Вт 2,49 кОм 0,5% Yageo	R135, R136, R137, R138, R167, R168, R169, R170	8	8.00E-07	6.4E-06	0.44	3.52	-55	125
R-0402 0,1 Вт 604 Ом 0,5% Yageo	R139, R140, R141, R142, R171, R172, R173, R174	8	8.00E-07	6.4E-06	0.44	3.52	-55	125
R-0402 0,1 Вт 866 Ом 0,5% Yageo	R143, R144, R145, R146, R175, R176, R177, R178	8	8.00E-07	6.4E-06	0.44	3.52	-55	125
R-0402 0,1 Вт 162 Ом 0,5% Yageo	R147, R148, R149, R150, R179, R180, R181, R182	8	8.00E-07	6.4E-06	0.44	3.52	-55	125
R-0402 0,1 Вт 210 Ом 0,5% Yageo	R151, R152, R153, R154, R183, R184, R185, R186	8	8.00E-07	6.4E-06	0.44	3.52	-55	125
R-0402 0,1 Вт 100 Ом 5% Yageo	R187, R188, R189, R190	4	1.45E-06	5.8E-06	0.53	2.11	-55	125

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
R-0402 0,1 Вт 30 кОм 5% Yageo	R195, R196	2	1.45E-06	2.9E-06	0.53	1.06	-55	125
R-0402 0,1 Вт 330 Ом 5% Yageo	R197	1	1.45E-06	1.45E-06	0.53	0.53	-55	125
R-0402 0,1 Вт 6,8 кОм 5% Yageo	R198, R200	2	1.45E-06	2.9E-06	0.53	1.06	-55	125
R-0402 0,1 Вт 150 кОм 5% Yageo	R201	1	1.45E-06	1.45E-06	0.53	0.53	-55	125
R-0402 0,1 Вт 180 кОм 5% Yageo	R202, R214	2	1.45E-06	2.9E-06	0.53	1.06	-55	125
R-0402 0,1 Вт 165 кОм 5% Yageo	R203, R205	2	1.45E-06	2.9E-06	0.53	1.06	-55	125
R-0402 0,1 Вт 36,5 кОм 5% Yageo	R204	1	1.45E-06	1.45E-06	0.53	0.53	-55	125
R-0402 0,1 Вт 52,3 кОм 5% Yageo	R206	1	1.45E-06	1.45E-06	0.53	0.53	-55	125
R-0402 0,1 Вт 120 кОм 5% Yageo	R210	1	1.45E-06	1.45E-06	0.53	0.53	-55	125
Кнопки, перемикачі								
KLS7-TS6611- 1.5-180 KLS	SB1	1	3.00E-04	0.0003	3.52	3.52	-20	70
Резонатори								
CDCE937PWRG4 Texas Instruments	UZ1	1	7.70E-05	0.000077	69.81	69.81	-60	125

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
Діоди								
CZRU52C3V9 Comchip Technology	VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6, VD7, VD8, VD9, VD10, VD11, VD12, VD13, VD14, VD15, VD16, VD17, VD18, VD19, VD20, VD21, VD22, VD23, VD24	24	3.00E-06	0.000072	2.05	49.28	-60	125
SD107WS Diodes Incorporated	VD25	1	3.10E-05	0.000031	10.03	10.03	-60	125
MBRS130T3G ON Semiconductor	VD26, VD27, VD28, VD29	4	1.80E-04	0.00072	2.73	10.91	-60	125
BZX84C5V1LT1G ON Semiconductor	VD30	1	3.00E-05	0.00003	0.56	0.56	-65	150
Транзистори								
AO3415A Alpha & Omega Semiconductor Inc.	VT1, VT5, VT7	3	5.00E-06	0.000015	2.38	7.13	-55	150
ESD5V3U2U Infineon Technologies	VT2, VT3, VT4	3	2.00E-06	0.000006	9.24	27.72	-55	150
HE8550G Unisonic Tech	VT6	1	2.00E-06	0.000002	9.24	9.24	-55	150
Роз'єми								
0901303108 Molex	XP1, XP2, XP3, XP4, XP5	5	1.26E-03	0.006285	24.05	120.26	-55	150
JTAG	XS1	1	0.00E+00	0	0.00	0.00	-55	150

Продовження таблиці У.1

Ім'я	Позначення на платі	К-т, шт.	Маса, кг	Загал. маса, кг	Ціна, грн	Загал. ціна, грн	Мін. темп., °C	Макс. темп., °C
2-406549-1 TE Connectivity AMP Connectors	XS2	1	4.00E-03	0.004	62.18	62.18	-55	150
5031821852 Molex	XS3	1	6.10E-04	0.00061	58.66	58.66	-25	85
MUSBB15134 Amphenol ICC (Commercial Products)	XS4	1	4.40E-03	0.0044	278.64	278.64	-25	85
BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd	XS5, XS6, XS7, XS8	4	1.26E-02	0.0504	117.32	469.29	-25	85
54-00134 Tensility International Corp	XS9	1	6.10E-04	0.00061	29.92	29.92	-25	85
Резонатори кварцові								
ECS-240-10-37Q-AES-TR ECS Inc.	ZQ1	1	2.00E-06	0.000002	24.02	24.02	-25	85
Датчики								
ADT7420UCPZ-RL7 Analog Devices Inc	BK1, BK2, BK3, BK4	4	2.00E-04	0.0008	24.02	96.09	-25	85
Інше								
Плата		1	6.86E-02	0.0686	1692.40	1692.40		
Монтаж елементів		1			225.46	225.46		

ДОДАТОК Ф

Температурний режим роботи приладу

З (рисунок Ф.1) добре видно, як гаряче повітря підіймається в гору і нагріває корпус приладу. І погано відводиться з корпусу тому, що холодне і гаряче повітря змішуються і потоки заважають один одному.

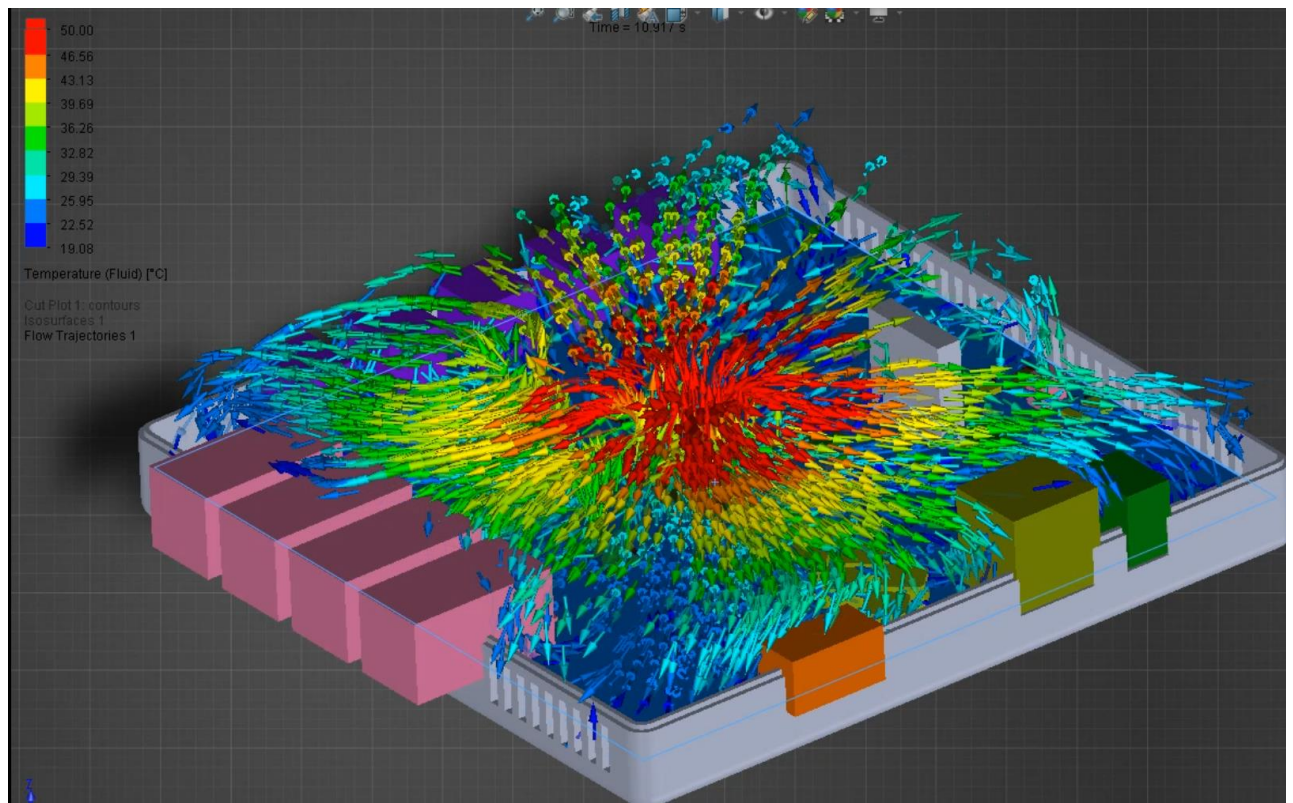


Рисунок Ф.1 – Робота приладу без примусової вентиляції у корпусі

На наступному (рисунок Ф.2) продемонстровано роботу приладу з вентилятором, який має габарити: 25 мм x 25 мм x 8 мм і об'єм повітря, що видувається 3,5 м³ за год, а саме 255N ebm-papst Inc. І живленням від 3,3 В до 5 В

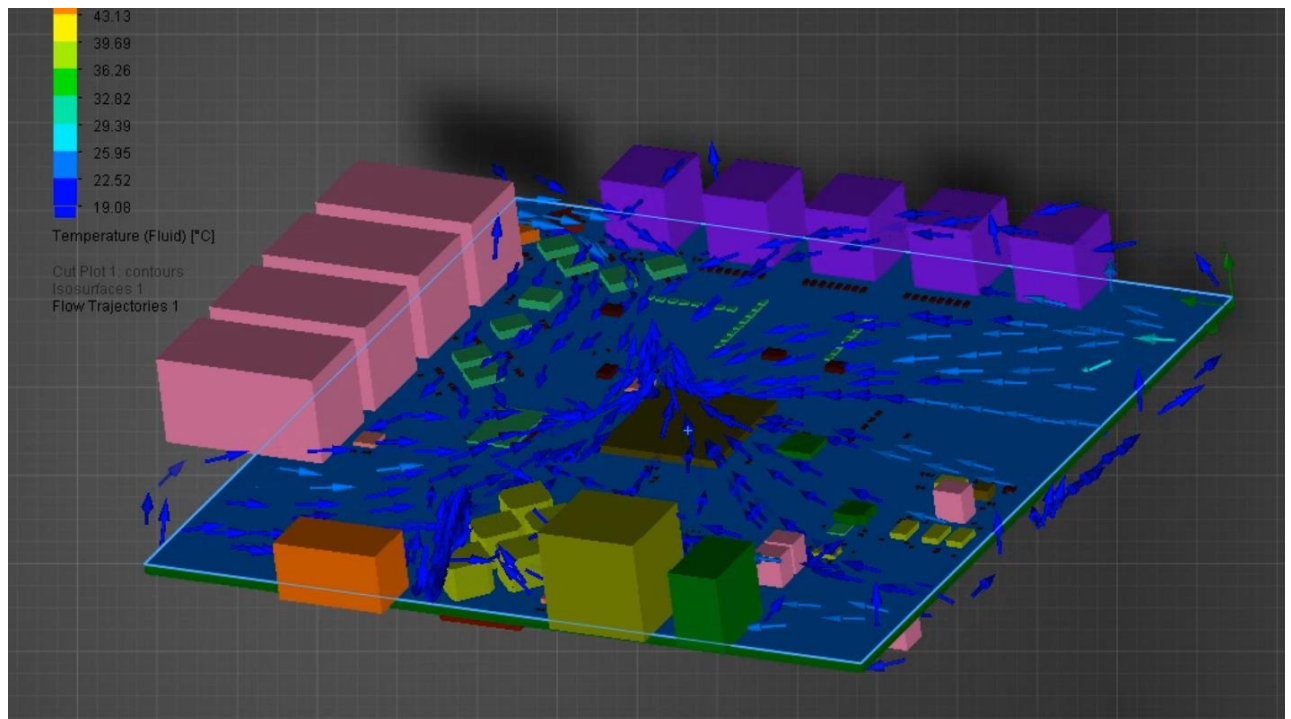


Рисунок Ф.2 – Робота приладу з примусовою вентиляцією у корпусі

ДОДАТОК Х

Програмний модуль

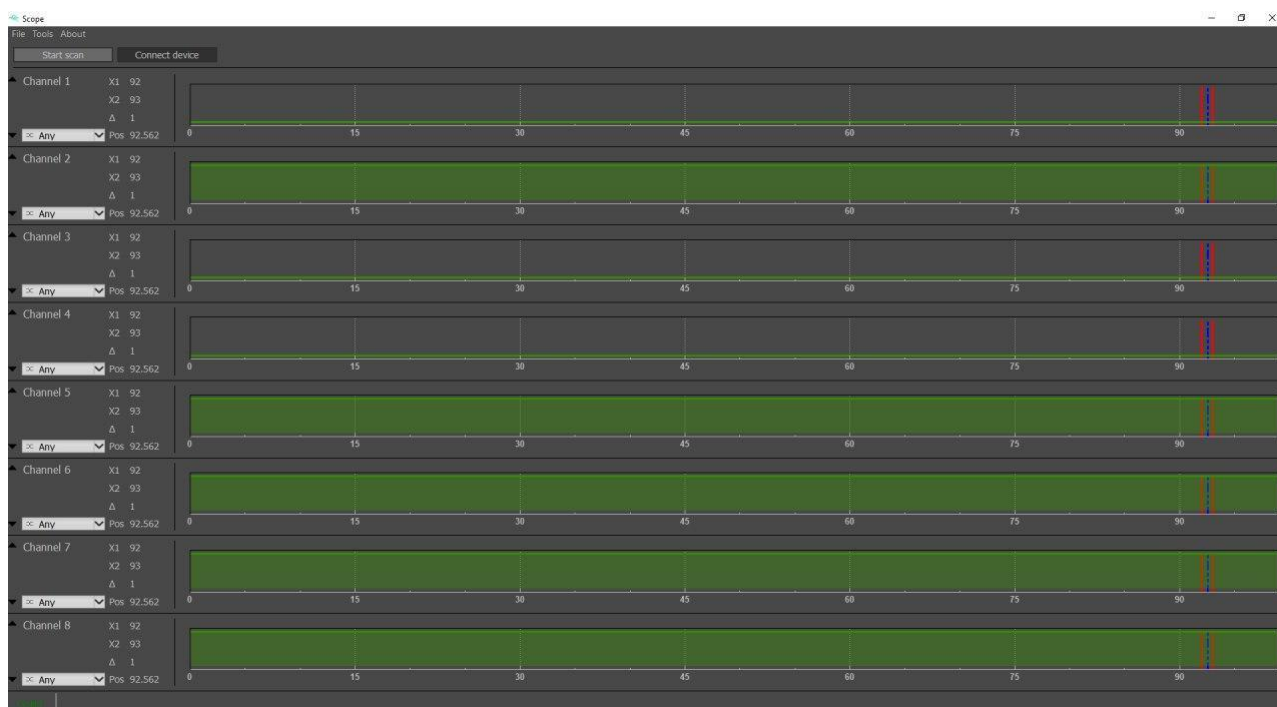


Рисунок Х.1 – Інтерфейс програми

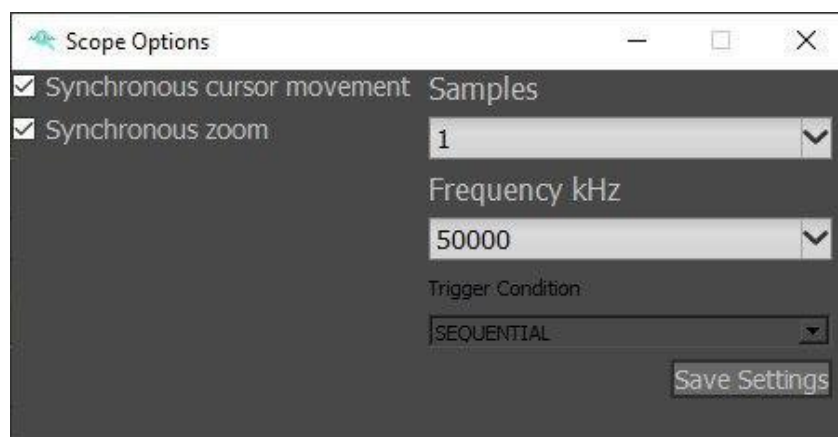


Рисунок Х.2 – Інтерфейс програми налаштування

ДОДАТОК Ц

Дизайн програмного модулю

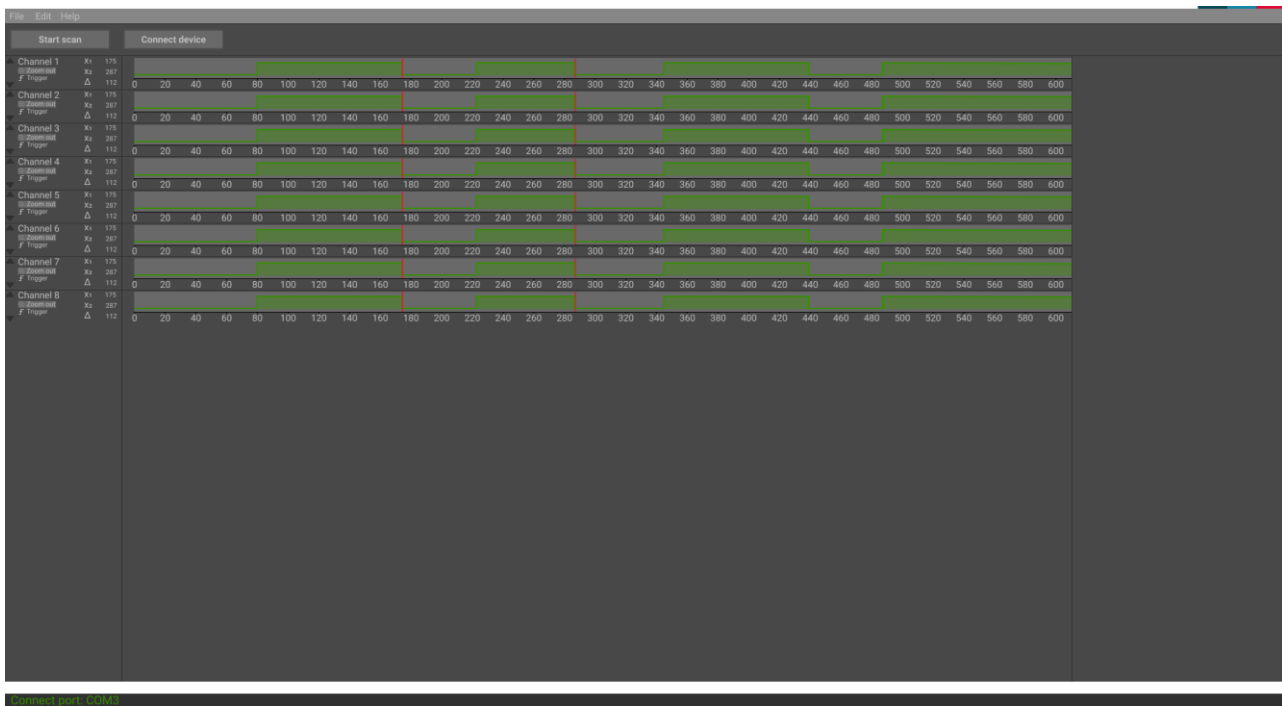


Рисунок Ц.1 – Інтерфейс програми дизайн

ДОДАТОК Ш

Номінали резисторів

Таблиця Ш.1 – Номінали резисторів

Найменування	Потужність	Точність	Номінал
R-0402 0,1 Вт 2 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	2 кОм
R-0603 0,1 Вт 100 Ом 5% Yageo	0,1 Вт	5%	100 Ом
R-0402 0,1 Вт 220 Ом 5% Yageo	0,1 Вт	5%	220 Ом
R-0402 0,1 Вт 4.7 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	4.7 кОм
CAY16-510J8LF 0,06 Вт 51 Ом 5% Bourns Inc.	0,06 Вт	5%	51 Ом
R-0402 0,1 Вт 51 Ом 5% Yageo	0,1 Вт	5%	51 Ом
R-0402 0,1 Вт 0 Ом 5% Yageo	0,1 Вт	5%	0 Ом
R-0402 0,1 Вт 4,7 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	4,7 кОм
R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	10 кОм
R-0402 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	1 кОм
R-0402 0,1 Вт 18,2 Ом 5% Yageo	0,1 Вт	5%	18,2 Ом
R-0201 0,1 Вт 4.7 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	4.7 кОм
R-0201 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	1 кОм
R-0402 0,1 Вт 49.9 Ом 5% Yageo	0,1 Вт	5%	49.9 Ом
R-0402 0,1 Вт 12,1 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	12,1 кОм
R-0603 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	10 кОм
R-0201 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	10 кОм
R-0402 0,1 Вт 120 Ом 5% Yageo	0,1 Вт	5%	120 Ом
R-0402 0,1 Вт 1 МОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	1 МОм
R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	100 кОм
R-0402 0,1 Вт 10,5 кОм 0,5% Yageo	0,1 Вт	0,5%	10,5 кОм
R-0402 0,1 Вт 16 кОм 0,5% Yageo	0,1 Вт	0,5%	16 кОм
R-0402 0,1 Вт 2,15 кОм 0,5% Yageo	0,1 Вт	0,5%	2,15 кОм
R-0402 0,1 Вт 2,49 кОм 0,5% Yageo	0,1 Вт	0,5%	2,49 кОм
R-0402 0,1 Вт 604 Ом 0,5% Yageo	0,1 Вт	0,5%	604 Ом
R-0402 0,1 Вт 866 Ом 0,5% Yageo	0,1 Вт	0,5%	866 Ом

Продовження таблиці Ш.1

Найменування	Потужність	Точність	Номинал
R-0402 0,1 Вт 162 Ом 0,5% Yageo	0,1 Вт	0,5%	162 Ом
R-0402 0,1 Вт 210 Ом 0,5% Yageo	0,1 Вт	0,5%	210 Ом
R-0402 0,1 Вт 100 Ом 5% Yageo	0,1 Вт	5%	100 Ом
R-0402 0,1 Вт 30 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	30 кОм
R-0402 0,1 Вт 330 Ом 5% Yageo	0,1 Вт	5%	330 Ом
R-0402 0,1 Вт 6,8 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	6,8 кОм
R-0402 0,1 Вт 150 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	150 кОм
R-0402 0,1 Вт 180 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	180 кОм
R-0402 0,1 Вт 165 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	165 кОм
R-0402 0,1 Вт 36,5 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	36,5 кОм
R-0402 0,1 Вт 52,3 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	52,3 кОм
R-0402 0,1 Вт 120 кОм 5% Yageo	0,1 Вт	5%	120 кОм

ДОДАТОК Щ

Номінали конденсаторів

Таблиця Щ.1 – Номінали резисторів

Найменування	Напруга	Точність	Номінал
0805 50 В 2,2 нФ 15% Kemet	50 В	15%	2,2 нФ
0805 16 В 100 нФ 15% Kemet	16В	15%	100 нФ
Tape & Reel (TR) 16 В 100 нФ 20% Kemet	16В	20%	100 нФ
0805 50 В 3,3 нФ 15% Kemet	50 В	15%	3,3 нФ
0805 50 В 4,7 нФ 15% Kemet	50 В	15%	4,7 нФ
0805 50 В 10 нФ 15% Kemet	50 В	15%	10 нФ
0805 10 В 470 нФ 15% Kemet	10 В	15%	470 нФ
0402 16 В 100 нФ 15% Kemet	16В	15%	100 нФ
0603 6,3 В 4 пФ 15% Kemet	6,3 В	15%	4 пФ
0603 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	6,3 В	15%	4,7 мкФ
0603 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	16В	15%	0,1 мкФ
0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	6,3 В	15%	4,7 мкФ
0402 50 В 10 нФ 15% Kemet	50 В	15%	10 нФ
0402 50 В 1 нФ 15% Kemet	50 В	15%	1 нФ
0402 50 В 33 пФ 15% Kemet	50 В	15%	33 пФ
0402 50 В 0,22 мкФ 15% Kemet	50 В	15%	0,22 мкФ
0402 10 В 1 мкФ 15% Kemet	10 В	15%	1 мкФ
0402 6,3 В 10 мкФ 15% Kemet	6,3 В	15%	10 мкФ
0603 50 В 10 нФ 15% Kemet	50 В	15%	10 нФ
0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	6,3 В	15%	4,7 мкФ
0402 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	16В	15%	0,1 мкФ
0402 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	16В	15%	0,1 мкФ
0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	6,3 В	15%	4,7 мкФ
0402 50 В 0,01 мкФ 15% Kemet	50 В	15%	0,01 мкФ
0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	10 В	15%	10 нФ
0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	10 В	15%	4,7 нФ

Продовження таблиці Ш.1

Найменування	Потужність	Точність	Номинал
0603 16 В 22 нФ 15% Kemet	16В	15%	22 нФ
0402 6,3 В 2,2 мкФ 15% Kemet	6,3 В	15%	2,2 мкФ
АHD 6,3 В 100 нФ 10% Kemet	6,3 В	10%	100 нФ
0805 6,3 В 10 мкФ 15% Kemet	6,3 В	15%	10 мкФ
АHD 6,3 В 100 мкФ 10% Kemet	6,3 В	10%	100 мкФ
АHD 6,3 В 10 мкФ 10% Kemet	6,3 В	10%	10 мкФ
АHD 2,5 В 330 мкФ 10% Kemet	2,5 В	10%	330 мкФ
0402 6,3 В 470 нФ 15% Kemet	6,3 В	15%	470 нФ
0402 10 В 10 мкФ 15% Kemet	10 В	15%	10 мкФ
0402 16 В 22 нФ 15% Kemet	16В	15%	22 нФ
0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	6,3 В	15%	100 нФ
0402 10 В 220 нФ 15% Kemet	10 В	15%	220 нФ
0402 16 В 47 нФ 15% Kemet	16В	15%	47 нФ
0402 10 В 100 нФ 15% Kemet	10 В	15%	100 нФ
0402 237 пФ 1% Kemet		1%	237 пФ
0402 15 В 100 пФ 1% Kemet		1%	100 пФ
0402 1,54 нФ 1% Kemet		1%	1,54 нФ
0402 100 нФ 1% Kemet		1%	100 нФ
0402 7,5 нФ 1% Kemet		1%	7,5 нФ
0402 82,5 нФ 1% Kemet		1%	82,5 нФ
0402 10 мкФ 15% Kemet		15%	10 мкФ
0201 15 В 10 мкФ 15% Kemet	15 В	15%	10 мкФ
0201 15 В 0,1 мкФ 15% Kemet	15 В	15%	0,1 мкФ
0402 15 В 1 мкФ 15% Kemet	15 В	15%	1 мкФ
0402 15 В 22 мкФ 15% Kemet	15 В	15%	22 мкФ
0402 15 В 33 мкФ 15% Kemet	15 В	15%	33 мкФ
0402 15 В 22 пФ 15% Kemet	15 В	15%	22 пФ
0402 10 В 47 мкФ 15% Kemet	10 В	15%	47 мкФ
0402 6,3 В 100 мкФ 15% Kemet	6,3 В	15%	100 мкФ
0402 6,3 В 47 мкФ 15% Kemet	6,3 В	15%	47 мкФ

Продовження таблиці Ш.1

Найменування	Потужність	Точність	Номінал
0402 15 В 10 нФ 15% Kemet	15 В	15%	10 нФ
0402 15 В 4,7 нФ 15% Kemet	15 В	15%	4,7 нФ
0402 15 В 47 мкФ 15% Kemet	15 В	15%	47 мкФ
0402 15 В 2,2 мкФ 15% Kemet	15 В	15%	2,2 мкФ
0402 15 В 100 нФ 15% Kemet	15 В	15%	100 нФ

ДОДАТОК Ю

Номінали індуктивностей

Індуктивності виконують роль резисторів, тому для деяких вказані опори.

Таблиця Ю.1 – Номінали індуктивностей

Найменування	Номінал
SRF0905-472Y Bourns Inc.	4,7 мГн
LBC2518T471K Taiyo Yuden	22 Ом
ELL-8UV470M Panasonic Electronic Components	100 Ом
LB3218T102K Taiyo Yuden	30 Ом
HI0805R800R-10 Laird-Signal Integrity Products	80 Ом
LQG18HN2N7S00D Murata Electronics	2,7 нГн

Справ. №			Перш. застосув.			
Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
				Документи		
A2			ДК61.750006.001 СК	Прилад. Складальне креслення	1	
				Складальні одиниці		
		1	ДК61.750706.001	Логічний аналізатор на ПЛІС	1	
				Складальне креслення		
				Деталі		
A2		2	ДК61.735314.001	Кришка	1	
A2		3	ДК61.735314.002	Корпус	1	
				Стандартні вироби		
		4		Гайка M2,5 DIN125	4	
		5		Гвинт M2x4 ISO7380	8	
		6		Гвинт M2,5x5 ISO7380	2	
		7		Гвинт M2,5x16 DIN967	4	
		8		Гвинт M3x20 ISO4762	4	
		9		Шайби M2,5 DIN934	4	

					ДК61.750006.001 СП				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Прилад Специфікація		Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		М.Д.Алдохін						1	2
Перев.		П.В.Кучернюк					КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, КЕОА		
Н.контр.		В.Г.Гудар							
Затв.		П.В.Кучернюк							
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.		Підп. та дата	

Справ. №				Перш. застосув.					
Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.			
				Документація					
A4			ДК61.4 11614.001 ПЕЗ	Логічний аналізатор на ПЛІС.	1				
				Перелік елементів					
A2			ДК61.4 11614.001 ЕЗ	Логічний аналізатор на ПЛІС.	1				
				Схема електрична принципова					
A2			ДК61.750706.001 СК	Логічний аналізатор на ПЛІС.	1				
				Складальне креслення					
				Деталі					
A2	1		ДК61.758726.001	Плата. друкована	1				
				Інші вироби					
				Діоди					
		2		BZX84C5V1LT1G ON Semiconductor	1	VD30			
		3		CZRU52C3V9 Comchip Technology	24	VD1-VD24			
		4		MBRS130T3G ON Semiconductor	4	VD26-VD29			
		5		SD107WS Diodes Incorporated	1	VD25			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ДК61.750706.001 СП				
Розроб.		М.Д.Алдохін			Логічний аналізатор на ПЛІС		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.		П.В.Кучернюк			Специфікація			1	11
Н.контр.		В.Г.Гудар			КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕМ, КЕОА				
Затв.		П.В.Кучернюк							
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.		Підп. та дата	

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				Кнопка		
		6		KLS7-TS6611-1.5-180 KLS	1	SB1
				Конденсатори		
		7		0201 15 В 0,1 мкФ 15% Kemet	5	С245-С249
		8		0201 15 В 10 мкФ 15% Kemet	6	С239-С244
		9		0402 6,3 В 1,54 нФ 1% Kemet	8	С175-С178,
						С211-С214
		10		0402 4 В 10 мкФ 15% Kemet	8	С199-С202,
						С235-С238
		11		0402 4 В 100 нФ 1% Kemet	24	С179-С182,
						С187-С190,
						С195-С198,
						С215-С218,
						С223-С226,
						С231-С234
		12		0402 6,3 В 237 нФ 1% Kemet	8	С167-С170,
						С203-С206
		13		0402 6,3 В 7,5 нФ 1% Kemet	8	С183-С186,
						С219-С222
		14		0402 6,3 82,5 нФ 1% Kemet	8	С191-С194,
						С227-С230
		15		0402 6,3 1 мкФ 15% Kemet	7	С36, С37,
						С46-С48,

					ДК61.750706.001 СП		Арк.
							2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.	Підп. та дата

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
						С100, С153
		16		0402 6,3 10 мкФ 15% Kemet	13	С104,
						С261-С272
		17		0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	27	С61, С65,
						С69, С74,
						С78, С81,
						С84, С87,
						С90, С99,
						С105, С111,
						С112, С116,
						С122, С125,
						С131, С134,
						С135, С139,
						С140, С143
						С157,
						С159-С162
		18		0402 10 В 100 нФ 15% Kemet	2	С136, С152
		19		0402 10 В 220 нФ 15% Kemet	2	С113, С115
		20		0402 16 В 4,7 нФ 15% Kemet	21	С62, С66,
						С70, С75,
						С79, С82,
						С85, С88,
						С91, С98,
						С128, С130,
						С132, С133,
						С137, С138,
						С142, С146,
						С148, С151,

					ДК61.750706.001 СП		Арк.
							3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.	Підп. та дата

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
						С154
		21		0402 16 В 1 мкФ 15% Kemet	11	С250-С252,
						С285-С287,
						С290-С292,
						С303, С304
		22		0402 16 В 47 мкФ 15% Kemet	1	С278
		23		0402 25 В 100 нФ 1% Kemet	8	С171-С174,
						С207-С210
		24		0402 25 В 10 нФ 15% Kemet	1	С293
		25		0402 25 В 100 нФ 15% Kemet	1	С302
		26		0402 25 В 2,2 мкФ 15% Kemet	2	С301, С307
		27		0402 25 В 22 мкФ 15% Kemet	9	С253-С256,
						С284,
						С289, С296,
						С298, С306
		28		0402 25 В 22 нФ 15% Kemet	3	С273-С275
		29		0402 25 В 4,7 нФ 15% Kemet	2	С294, С305
		30		0402 25 В 33 мкФ 15% Kemet	4	С257-С260
		31		0402 25 В 47 мкФ 15% Kemet	1	С300
		32		0402 30 В 0,1 мкФ 10% Kemet	5	С55, С57,
						С60, С73,
						С299
		33		0402 30 В 0.1 мкФ 15% Kemet	1	С54

					ДК61.750706.001 СП		Арк.
							4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.	Підп. та дата

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		34		0402 30 В 0,1 мкФ 20% Kemet	3	С23, С288,
						С295
		35		0402 32 В 22 нФ 15% Kemet	6	С106, С119,
						С121, С141,
						С155, С156
		36		0402 32 В 47 нФ 15% Kemet	5	С114, С124,
						С126, С129,
						С145
		37		0402 32 В 0,1 мкФ 15% Kemet	1	С59
		38		0402 35 В 22 нФ 15% Kemet	5	С34, С35,
						С42-С44
		39		0402 35 В 33 нФ 15% Kemet	1	С33
		40		0402 35 В 1 нФ 15% Kemet	1	С32
		41		0402 35 В 10 нФ 15% Kemet	1	С31
		42		0402 35 В 100 нФ 15% Kemet	14	С108, С110,
						С117, С118,
						С120, С123,
						С127, С144,
						С147, С158,
						С163-С166
		43		0402 35 В 470 нФ 15% Kemet	4	С102, С107,
						С109, С150
		44		0402 35 В 2,2 мкФ 15% Kemet	7	С64, С68,
						С72, С77,
						С80, С83,
						С101
		45		0402 35 В 4,7 мкФ 10% Kemet	4	С56, С58,

					ДК61.750706.001 СП		Арк.
							5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.	Підп. та дата

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
						С103, С149
		46		0402 35 В 4,7 мкФ 15% Kemet	1	С53
		47		0402 35 В 10 мкФ 15% Kemet	5	С38, С39,
						С50-С52
		48		0402 35 В 47 мкФ 15% Kemet	1	С283
		49		0402 35 В 100 мкФ 15% Kemet	2	С281, С282
		50		0402 50 В 4.7 мкФ 15% Kemet	1	С30
		51		0402 50 В 10 мкФ 15% Kemet	1	С30
		52		0603 4 В 0,1 мкФ 15% Kemet	3	С27-С29
		53		0603 6,3 В 4 нФ 15% Kemet	2	С24, С25
		54		0603 6,3 В 10 нФ 15% Kemet	4	С40, С41,
						С45, С49
		55		0603 6,3 В 22 нФ 15% Kemet	4	С63, С67,
						С71, С76
		56		0603 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	1	С26
		57		0805 10 В 470 нФ 15% Kemet	3	С20-С22
		58		0805 16 В 100 нФ 15% Kemet	5	С2, С4, С16,
						С18, С19
		59		0805 25 В 10 нФ 15% Kemet	3	С13-С15
		60		0805 35 В 2,2 нФ 15% Kemet	6	С1, С3, С5,
						С6, С8, С9

					ДК61.750706.001 СП		Арк.
							6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.	Підп. та дата

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		61		0805 35 В 3,3 нФ 15% Kemet	1	С10
		62		0805 35 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	С11
		63		0805 50 В 10 мкФ 15% Kemet	1	С92
		64		AHD 2,5 В 330 мкФ 10% Kemet	2	С97, С276
		65		AHD 6,3 В 10 мкФ 10% Kemet	1	С96
		66		AHD 6,3 В 100 мкФ 10% Kemet	7	С93-С95,
						С277, С279,
						С280, С297
		67		AHD 10 В 100 нФ 10% Kemet	2	С86, С89
		68		Tape & Reel (TR) 16 В 100 нФ	3	С7, С12,
				20% Kemet		С17
				Котушки індуктивності		
		69		ELL-8UV470M Panasonic	5	Л5-Л9
				Electronic Components		
		70		H10805R800R-10	2	Л11, Л19
				Laird-Signal Integrity		
				Products		
		71		LB3218T102K Taiyo Yuden	1	Л10
		72		LBC2518T471K Taiyo Yuden	2	Л3, Л4
		73		LQG18HN2N7S00D Murata	7	Л12-Л18
				Electronics		
		74		SRF0905-472Y Bourns Inc.	2	Л1, Л2

					ДК61.750706.001 СП		Арк.
							7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №	Інв. № дудл.	Підп. та дата	

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка	
				Фільтр кварцовий			
		75		ECS-240-10-37Q-AES-TR ECS Inc.	1	ZQ1	
				Перетворювач частот			
		76		CDCE937PWRG4 Texas Instruments	1	UZ1	
				Пристрої			
				індикації і сигналізації			
		77		LED 0603 green	2	HL1, HL2	
				Резистори			
		78		CAU16-510J8LF 0,06 Вт 51 Ом	3	R8, R10,	
				5% Bourns Inc.		R11	
		79		R-0201 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	3	R57-R59	
		80		R-0201 0,1 Вт 4.7 кОм 5% Yageo	21	R36-R56	
		81		R-0201 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	5	R96-R100	
		82		R-0402 0,1 Вт 0 Ом 5% Yageo	10	R12-R21	
		83		R-0402 0,1 Вт 18,2 Ом 5% Yageo	5	R27-R29,	
						R32, R33	
		84		R-0402 0,1 Вт 49.9 Ом 5% Yageo	8	R60,	
						R62-R68	
		85		R-0402 0,1 Вт 51 Ом 5% Yageo	1	R9	
				ДК61.750706.001 СП			Арк.
							8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №	Інв. № дудл.	Підп. та дата	

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		86		R-0402 0,1 Вт 100 Ом 5% Yageo	4	R187-R190
		87		R-0402 0,1 Вт 120 Ом 5% Yageo	2	R102, R103
		88		R-0402 0,1 Вт 162 Ом 0,5% Yageo	8	R147-R150,
						R179-R182
		89		R-0402 0,1 Вт 210 Ом 0,5% Yageo	8	R151-R154,
						R183-R186
		90		R-0402 0,1 Вт 220 Ом 5% Yageo	4	R4, R5,
						R69, R70
		91		R-0402 0,1 Вт 330 Ом 5% Yageo	1	R197
		92		R-0402 0,1 Вт 604 Ом 0,5% Yageo	8	R139-R142,
						R171-R174
		93		R-0402 0,1 Вт 866 Ом 0,5% Yageo	8	R143-R146,
						R175-R178
		94		R-0402 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	6	R26, R30,
						R31,
						R110, R111,
						R212
		95		R-0402 0,1 Вт 2 кОм 5% Yageo	3	R1, R213,
						R215
		96		R-0402 0,1 Вт 2,15 кОм	8	R131-R134,
				0,5% Yageo		R163-R166
		97		R-0402 0,1 Вт 2,49 кОм	8	R135-R138,
				0,5% Yageo		R167-R170
		98		R-0402 0,1 Вт 4,7 кОм 1% Yageo	2	R22, R23
		99		R-0402 0,1 Вт 4.7 кОм 5% Yageo	5	R6, R7,
						R34, R35,
						R106
		100		R-0402 0,1 Вт 6,8 кОм 5% Yageo	2	R198, R200
		101		R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	18	R24, R25,
						R95, R101,

					ДК61.750706.001 СП		Арк.
							9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №	Інв. № дудл.	Підп. та дата	

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
						R104, R105,
						R113-R122,
						R194, R208
		102		R-0402 0,1 Вт 10,5 кОм	8	R123-R126,
				0,5% Yageo		R155-R158
		103		R-0402 0,1 Вт 12,1 кОм 5% Yageo	1	R61
		104		R-0402 0,1 Вт 16 кОм 0,5% Yageo	8	R127-R130,
		105		R-0402 0,1 Вт 30 кОм 5% Yageo	2	R195, R196
		106		R-0402 0,1 Вт 36,5 кОм 5% Yageo	1	R204
		107		R-0402 0,1 Вт 52,3 кОм 5% Yageo	1	R206
		108		R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	10	R108, R109,
						R112,
						R191-R193,
						R199, R207,
						R209, R211
		109		R-0402 0,1 Вт 120 кОм 5% Yageo	1	R210
		110		R-0402 0,1 Вт 150 кОм 5% Yageo	1	R201
		111		R-0402 0,1 Вт 165 кОм 5% Yageo	2	R203, R205
		112		R-0402 0,1 Вт 180 кОм 5% Yageo	2	R202, R214
		113		R-0402 0,1 Вт 1 МОм 5% Yageo	1	R107
		114		R-0603 0,1 Вт 100 Ом 5% Yageo	2	R2, R3
		115		R-0603 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	24	R71-R94
				Роз'єми		
		116		0901303108 Molex	5	XP1-XP5
		117		2-406549-1 TE Connectivity	1	XS2
				AMP Connectors		
		118		5031821852 Molex	1	XS3

					ДК61.750706.001 СП				Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата					10
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.		Підп. та дата	

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		119		54-00134 Tensility	1	XS9
				International Corp		
		120		BNC(75)-PLR-PC-12G-1	4	XS5-XS8
				Hirose Electric Co Ltd		
		121		Fan Fan	1	XS10
		122		JTAG	1	XS1
		123		MUSBB15134 Amphenol ICC	1	XS4
				(Commercial Products)		
				Схеми інтегральні		
		124		5CSEBA6U23I7 Intel	1	DD1
		125		74LV4051BQ, 115 Nexperia	4	DD3, DD12,
				USA Inc.		DD21, DD33
		126		AD7606BSTZ-RL Analog	1	DA1
				Devices Inc		
		127		ATWINC1500-MR210PB	1	DD34
				Microchip Technology		
		128		EPCS64 Intel	1	DS2
		129		FT232R FTDI	1	DD30
		130		IS43TR16256A-15HBL ISSI	1	DS1
		131		KSZ9031RNX2R Microchip	1	DD2
		132		LT1111 Linear	4	DD51-DD54
				Technology/Analog Devices		
		133		LT3080EMS8E Linear	4	DA5-DA7,
				Technology/Analog Devices		DA9
		134		LT3612EUDC Linear	2	DA3, DA4
				Technology/Analog Devices		
		135		LT3616IUD#TRPBF Linear	1	DA2
				Technology/Analog Devices		

					ДК61.750706.001 СП		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			11
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.	
						Підп. та дата	

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		136		OPA2690ID Texas Instruments	16	DD35-DD50
		137		SN74AXC1T45DRLR Texas_Instrument_Team	24	DD4-DD11, DD13-DD20, DD22-DD29
		138		TPD2E001DRLR Texas Instruments	1	DD31
		139		TPS3831K33 Texas Instruments	1	DD32
		140		TPS51200DRCR Texas Instruments	1	DA8
				Тепловий датчик		
		141		ADT7420UCPZ-RL 7 Analog Devices Inc	4	BK1-BK4
				Транзистори		
		142		A03415A Alpha & Omega Semiconductor Inc.	3	VT1, VT5, VT7
		143		ESD5V3U2U Infineon Technologies	3	VT2-VT4
		144		HE8550G Unisonic Tech	1	VT6
				Матеріали		
		145		ПОС 61 ГОСТ 21930-76	102	
		146		Флюс-гель FVS-BGA-F5	10м	

					ДК61.750706.001 СП		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			12
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.	
						Підп. та дата	

Справ. №		Перв. застосув.	
Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Конденсатори</u>		
с1	0805 50 В 2,2 нФ 15% Kemet	1	
с2	0805 16 В 100 нФ 15% Kemet	1	
с3	0805 50 В 2,2 нФ 15% Kemet	1	
с4	0805 16 В 100 нФ 15% Kemet	1	
с5, с6	0805 50 В 2,2 нФ 15% Kemet	2	
с7	Tape & Reel (TR) 16 В 100 нФ 20% Kemet	1	
с8,с9	0805 50 В 2,2 нФ 15% Kemet	2	
с10	0805 50 В 3,3 нФ 15% Kemet	1	
с11	0805 50 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
с12	Tape & Reel (TR) 16 В 100 нФ 20% Kemet	1	
с13-с15	0805 50 В 10 нФ 15% Kemet	3	
с16	0805 16 В 100 нФ 15% Kemet	1	
с17	Tape & Reel (TR) 16 В 100 нФ 20% Kemet	1	
с18,с19	0805 16 В 100 нФ 15% Kemet	2	
с20-с22	0805 10 В 470 нФ 15% Kemet	3	
с23	0402 16 В 100 нФ 15% Kemet	1	
с24,с25	0603 6,3 В 4 нФ 15% Kemet	2	
с26	0603 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	1	
с27-с29	0603 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	3	
с30	0402 6,3 В 4.7 мкФ 15% Kemet	1	
с31	0402 50 В 10 нФ 15% Kemet	1	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Логічний аналізатор на ПЛІС Перелік елементів		Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розраб.		М.Д.Алдохін						1	13	
Перев.		П.В.Кучернюк					КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, ДК-61			
Н.контр.		В.Г.Гудар								
Затв.		П.В.Кучернюк								
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №		Інв. № дудл.		Підп. та дата		

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Конденсатори</u>		
С32	0402 50 В 1 нФ 15% Kemet	1	
С33	0402 50 В 33 пФ 15% Kemet	1	
С34, С35	0402 50 В 0,22 мкФ 15% Kemet	2	
С36, С37	0402 10 В 1 мкФ 15% Kemet	2	
С38, С39	0402 6,3 В 10 мкФ 15% Kemet	2	
С40, С41	0603 50 В 10 нФ 15% Kemet	2	
С42-С44	0402 50 В 0,22 мкФ 15% Kemet	3	
С45	0603 50 В 10 нФ 15% Kemet	1	
С46-С48	0402 10 В 1 мкФ 15% Kemet	3	
С49	0603 50 В 10 нФ 15% Kemet	1	
С50-С52	0402 6,3 В 10 мкФ 15% Kemet	3	
С53	0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	1	
С54	0402 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	1	
С55	0402 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	1	
С56	0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	1	
С57	0402 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	1	
С58	0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	1	
С59	0402 50 В 0,01 мкФ 15% Kemet	1	
С60	0402 16 В 0,1 мкФ 15% Kemet	1	
С61	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	1	
С62	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С63	0603 16 В 22 нФ 15% Kemet	1	
С64	0402 6,3 В 2,2 мкФ 15% Kemet	1	
С65	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	1	
С66	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С67	0603 16 В 22 нФ 15% Kemet	1	
С68	0402 6,3 В 2,2 мкФ 15% Kemet	1	

					ДК61.4 116 14.001 ПЕЗ		Арк.
							2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. та дата	

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Конденсатори</u>		
с69	0402 10 В 10 нФ 15% Кemet	1	
с70	0402 10 В 4,7 нФ 15% Кemet	1	
с71	0603 16 В 22 нФ 15% Кemet	1	
с72	0402 6,3 В 2,2 мкФ 15% Кemet	1	
с73	0402 16 В 0,1 мкФ 15% Кemet	1	
с74	0402 10 В 10 нФ 15% Кemet	1	
с75	0402 10 В 4,7 нФ 15% Кemet	1	
с76	0603 16 В 22 нФ 15% Кemet	1	
с77	0402 6,3 В 2,2 мкФ 15% Кemet	1	
с78	0402 10 В 10 нФ 15% Кemet	1	
с79	0402 10 В 4,7 нФ 15% Кemet	1	
с80	0402 6,3 В 2,2 мкФ 15% Кemet	1	
с81	0402 10 В 10 нФ 15% Кemet	1	
с82	0402 10 В 4,7 нФ 15% Кemet	1	
с83	0402 6,3 В 2,2 мкФ 15% Кemet	1	
с84	0402 10 В 10 нФ 15% Кemet	1	
с85	0402 10 В 4,7 нФ 15% Кemet	1	
с86	AHD 6,3 В 100 нФ 10% Кemet	1	
с87	0402 10 В 10 нФ 15% Кemet	1	
с88	0402 10 В 4,7 нФ 15% Кemet	1	
с89	AHD 6,3 В 100 нФ 10% Кemet	1	
с90	0402 10 В 10 нФ 15% Кemet	1	
с91	0402 10 В 4,7 нФ 15% Кemet	1	
с92	0805 6,3 В 10 мкФ 15% Кemet	1	
с93-с95	AHD 6,3 В 100 мкФ 10% Кemet	3	
с96	AHD 6,3 В 10 мкФ 10% Кemet	1	
с97	AHD 2,5 В 330 мкФ 10% Кemet	1	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ				Арк.
									3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата					
Інв. № подл.		Підп. та дата			Взам. інв. №		Інв. № дубл.		Підп. та дата

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Конденсатори</u>		
с98	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
с99	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	1	
с100	0402 10 В 1 мкФ 15% Kemet	1	
с101	0402 6,3 В 2,2 мкФ 15% Kemet	1	
с102	0402 6,3 В 470 нФ 15% Kemet	1	
с103	0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	1	
с104	0402 10 В 10 мкФ 15% Kemet	1	
с105	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	1	
с106	0402 16 В 22 нФ 15% Kemet	1	
с107	0402 6,3 В 470 нФ 15% Kemet	1	
с108	0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	1	
с109	0402 6,3 В 470 нФ 15% Kemet	1	
с110	0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	1	
с111, с112	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	2	
с113	0402 10 В 220 нФ 15% Kemet	1	
с114	0402 16 В 47 нФ 15% Kemet	1	
с115	0402 10 В 220 нФ 15% Kemet	1	
с116	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	1	
с117, с118	0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	2	
с119	0402 16 В 22 нФ 15% Kemet	1	
с120	0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	1	
с121	0402 16 В 22 нФ 15% Kemet	1	
с122	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	1	
с123	0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	1	
с124	0402 16 В 47 нФ 15% Kemet	1	
с125	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	1	
с126	0402 16 В 47 нФ 15% Kemet	1	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ			Арк.
								4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Інв. № подл.		Підп. та дата			Взам. інв. №		Інв. № дубл.	
							Підп. та дата	

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Конденсатори</u>		
С127	0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	1	
С128	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С129	0402 16 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С130	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С131	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	1	
С132, С133	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	2	
С134, С135	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	2	
С136	0402 10 В 100 нФ 15% Kemet	1	
С137, С138	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	2	
С139, С140	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	2	
С141	0402 16 В 22 нФ 15% Kemet	1	
С142	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С143	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	1	
С144	0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	1	
С145	0402 16 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С146	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С147	0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	1	
С148	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С149	0402 6,3 В 4,7 мкФ 15% Kemet	1	
С150	0402 6,3 В 470 нФ 15% Kemet	1	
С151	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С152	0402 10 В 100 нФ 15% Kemet	1	
С153	0402 10 В 1 мкФ 15% Kemet	1	
С154	0402 10 В 4,7 нФ 15% Kemet	1	
С155, С156	0402 16 В 22 нФ 15% Kemet	2	
С157	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	1	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ				Арк.
									5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата					
Інв. № подл.		Підп. та дата			Взам. інв. №		Інв. № дубл.		Підп. та дата

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Конденсатори</u>		
С158	0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	1	
С159-С162	0402 10 В 10 нФ 15% Kemet	4	
С163-С166	0402 6,3 В 100 нФ 15% Kemet	4	
С167-С170	0402 15 В 237 пФ 1% Kemet	4	
С171-С174	0402 15 В 100 пФ 1% Kemet	4	
С175-С178	0402 15 В 1,54 нФ 1% Kemet	4	
С179-С182	0402 15 В 100 нФ 1% Kemet	4	
С183-С186	0402 15 В 7,5 нФ 1% Kemet	4	
С187-С190	0402 15 В 100 нФ 1% Kemet	4	
С191-С194	0402 15 В 82,5 нФ 1% Kemet	4	
С195-С198	0402 15 В 100 нФ 1% Kemet	4	
С199-С202	0402 15 В 10 мкФ 15% Kemet	4	
С203-С206	0402 15 В 237 пФ 1% Kemet	4	
С207-С210	0402 15 В 100 пФ 1% Kemet	4	
С211-С214	0402 15 В 1,54 нФ 1% Kemet	4	
С215-С218	0402 15 В 100 нФ 1% Kemet	4	
С219-С222	0402 15 В 7,5 нФ 1% Kemet	4	
С223-С226	0402 15 В 100 нФ 1% Kemet	4	
С227-С230	0402 15 В 82,5 нФ 1% Kemet	4	
С231-С234	0402 15 В 100 нФ 1% Kemet	4	
С235-С238	0402 15 В 10 мкФ 15% Kemet	4	
С239-С244	0201 15 В 10 мкФ 15% Kemet	6	
С245-С249	0201 15 В 0,1 мкФ 15% Kemet	5	
С250-С252	0402 15 В 1 мкФ 15% Kemet	3	
С253-С256	0402 15 В 22 мкФ 15% Kemet	4	
С257-С260	0402 15 В 33 мкФ 15% Kemet	4	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ		Арк.
							6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
					Взам. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. та дата
Інв. № подл.		Підп. та дата					

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Конденсатори</u>		
С261-С272	0402 10 В 10 мкФ 15% Кemet	12	
С273-С275	0402 15 В 22 нФ 15% Кemet	3	
С276	АHD 2,5 В 330 мкФ 10% Кemet	1	
С277	АHD 6,3 В 100 мкФ 10% Кemet	1	
С278	0402 10 В 47 мкФ 15% Кemet	1	
С279,С280	АHD 6,3 В 100 мкФ 10% Кemet	2	
С281,С282	0402 6,3 В 100 мкФ 15% Кemet	2	
С283	0402 6,3 В 47 мкФ 15% Кemet	1	
С284	0402 15 В 22 мкФ 15% Кemet	1	
С285-С287	0402 15 В 1 мкФ 15% Кemet	3	
С288	0402 16 В 100 нФ 15% Кemet	1	
С289	0402 15 В 22 мкФ 15% Кemet	1	
С290-С292	0402 15 В 1 мкФ 15% Кemet	3	
С293	0402 15 В 10 нФ 15% Кemet	1	
С294	0402 15 В 4,7 нФ 15% Кemet	1	
С295	0402 16 В 100 нФ 15% Кemet	1	
С296	0402 15 В 22 мкФ 15% Кemet	1	
С297	АHD 6,3 В 100 мкФ 10% Кemet	1	
С298	0402 15 В 22 мкФ 15% Кemet	1	
С299	0402 16 В 0,1 мкФ 15% Кemet	1	
С300	0402 15 В 47 мкФ 15% Кemet	1	
С301	0402 15 В 2,2 мкФ 15% Кemet	1	
С302	0402 15 В 100 нФ 15% Кemet	1	
С303,С304	0402 15 В 1 мкФ 15% Кemet	2	
С305	0402 15 В 4,7 нФ 15% Кemet	1	
С306	0402 15 В 22 мкФ 15% Кemet	1	
С307	0402 15 В 2,2 мкФ 15% Кemet	1	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ				Арк.
									7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата					
Інв. № подл.		Підп. та дата			Взам. інв. №		Інв. № дубл.		Підп. та дата

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Мікросхеми</u>		
DA1	AD7606BSTZ-RL Analog Devices Inc	1	
DA2	LTC3616IUD#TRPBF Linear Technology/Analog Devices	1	
DA3,DA4	LTC3612EUDC Linear Technology/Analog Devices	2	
DA5- DA7	LT3080EMS8E Linear Technology/Analog Devices	3	
DA8	TPS51200DRCR Texas Instruments	1	
DA9	LT3080EMS8E Linear Technology/Analog Devices	1	
DD1	5CSEBA6U23I7 Intel	1	
DD2	KSZ9031RX2R Microchip	1	
DD3	74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	1	
DD4- DD11	SN74AXC1T45DRLR Texas_Instrument_Team	8	
DD12	74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	1	
DD13- DD20	SN74AXC1T45DRLR Texas_Instrument_Team	8	
DD21	74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	1	
DD22- DD29	SN74AXC1T45DRLR Texas_Instrument_Team	8	
DD30	FT232R FTDI	1	
DD31	TPD2E001DRLR Texas Instruments	1	
DD32	TPS3831K33 Texas Instruments	1	
DD33	74LV4051BQ,115 Nexperia USA Inc.	1	
DD34	ATWINC1500-MR210PB Microchip Technology	1	
DD35-DD50	OPA2690ID Texas Instruments	16	
DD51-DD54	LT1111 Linear Technology/Analog Devices	4	
DS1	IS43TR16256A-15HBL ISSI	1	
DS2	EPCS64 Intel	1	
	<u>Пристрої індикації</u>		
HL1,HL2	LED 0603 green	2	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ			Арк.
								8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №	Інв. № дудл.	Підп. та дата		

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Котушки індуктивності</u>		
L1,L2	SRF0905-472Y Bourns Inc.	2	
L3,L4	LBC2518T471K Taiyo Yuden	2	
L5-L9	ELL-8UV470M Panasonic Electronic Components	5	
L10	LB3218T102K Taiyo Yuden	1	
L11	H10805R800R-10 Laird-Signal Integrity Products	1	
L12-L18	LQG18HN2N7S00D Murata Electronics	7	
L19	H10805R800R-10 Laird-Signal Integrity Products	1	
	<u>Резистори</u>		
R1	R-0402 0,1 Вт 2 кОм 5% Yageo	1	
R2,R3	R-0603 0,1 Вт 100 Ом 5% Yageo	2	
R4,R5	R-0402 0,1 Вт 220 Ом 5% Yageo	2	
R6,R7	R-0402 0,1 Вт 4,7 кОм 5% Yageo	2	
R8	CAY16-510J8LF 0,06 Вт 51 Ом 5% Bourns Inc.	1	
R9	R-0402 0,1 Вт 51 Ом 5% Yageo	1	
R10,R11	CAY16-510J8LF 0,06 Вт 51 Ом 5% Bourns Inc.	2	
R12-R21	R-0402 0,1 Вт 0 Ом 5% Yageo	10	
R22,R23	R-0402 0,1 Вт 4,7 кОм 5% Yageo	2	
R24,R25	R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	2	
R26	R-0402 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	1	
R27-R29	R-0402 0,1 Вт 18,2 Ом 5% Yageo	3	
R30,R31	R-0402 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	2	
R32,R33	R-0402 0,1 Вт 18,2 Ом 5% Yageo	2	
R34,R35	R-0402 0,1 Вт 4,7 кОм 5% Yageo	2	
R36-R56	R-0201 0,1 Вт 4,7 кОм 5% Yageo	21	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ			Арк.
								9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Інв. № подл.		Підп. та дата			Взам. інв. №		Інв. № дубл.	
							Підп. та дата	

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Резистори</u>		
R57-R59	R-0201 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	3	
R60	R-0402 0,1 Вт 49.9 Ом 5% Yageo	1	
R61	R-0402 0,1 Вт 12,1 кОм 5% Yageo	1	
R62-R68	R-0402 0,1 Вт 49.9 Ом 5% Yageo	7	
R69,R70	R-0402 0,1 Вт 220 Ом 5% Yageo	2	
R71-R94	R-0603 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	24	
R95	R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	1	
R96-R100	R-0201 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	5	
R101	R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	1	
R102, R103	R-0402 0,1 Вт 120 Ом 5% Yageo	2	
R104, R105	R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	2	
R106	R-0402 0,1 Вт 4.7 кОм 5% Yageo	1	
R107	R-0402 0,1 Вт 1 МОм 5% Yageo	1	
R108, R109	R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	2	
R110, R111	R-0402 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	2	
R112	R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	1	
R113- R122	R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	10	
R123- R126	R-0402 0,1 Вт 10,5 кОм 0,5% Yageo	4	
R127- R130	R-0402 0,1 Вт 16 кОм 0,5% Yageo	4	
R131- R134	R-0402 0,1 Вт 2,15 кОм 0,5% Yageo	4	
R135- R138	R-0402 0,1 Вт 2,49 кОм 0,5% Yageo	4	
R139- R142	R-0402 0,1 Вт 604 Ом 0,5% Yageo	4	
R143- R146	R-0402 0,1 Вт 866 Ом 0,5% Yageo	4	
R147- R150	R-0402 0,1 Вт 162 Ом 0,5% Yageo	4	
R151- R154	R-0402 0,1 Вт 210 Ом 0,5% Yageo	4	
R155- R158	R-0402 0,1 Вт 10,5 кОм 0,5% Yageo	4	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ		Арк.
							10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. та дата	

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Резистори</u>		
R159- R162	R-0402 0,1 Вт 16 кОм 0,5% Yageo	4	
R163- R166	R-0402 0,1 Вт 2,15 кОм 0,5% Yageo	4	
R167- R170	R-0402 0,1 Вт 2,49 кОм 0,5% Yageo	4	
R171- R174	R-0402 0,1 Вт 604 Ом 0,5% Yageo	4	
R175- R178	R-0402 0,1 Вт 866 Ом 0,5% Yageo	4	
R179- R182	R-0402 0,1 Вт 162 Ом 0,5% Yageo	4	
R183- R186	R-0402 0,1 Вт 210 Ом 0,5% Yageo	4	
R187- R190	R-0402 0,1 Вт 100 Ом 5% Yageo	4	
R191- R193	R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	3	
R194	R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	1	
R195, R196	R-0402 0,1 Вт 30 кОм 5% Yageo	2	
R197	R-0402 0,1 Вт 330 Ом 5% Yageo	1	
R198	R-0402 0,1 Вт 6,8 кОм 5% Yageo	1	
R199	R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	1	
R200	R-0402 0,1 Вт 6,8 кОм 5% Yageo	1	
R201	R-0402 0,1 Вт 150 кОм 5% Yageo	1	
R202	R-0402 0,1 Вт 180 кОм 5% Yageo	1	
R203	R-0402 0,1 Вт 165 кОм 5% Yageo	1	
R204	R-0402 0,1 Вт 36,5 кОм 5% Yageo	1	
R205	R-0402 0,1 Вт 165 кОм 5% Yageo	1	
R206	R-0402 0,1 Вт 52,3 кОм 5% Yageo	1	
R207	R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	1	
R208	R-0402 0,1 Вт 10 кОм 5% Yageo	1	
R209	R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	1	
R210	R-0402 0,1 Вт 120 кОм 5% Yageo	1	
R211	R-0402 0,1 Вт 100 кОм 5% Yageo	1	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ				Арк.
									11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата					
Інв. № подл.		Підп. та дата			Взам. інв. №		Інв. № дубл.		Підп. та дата

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Резистори</u>		
R212	R-0402 0,1 Вт 1 кОм 5% Yageo	1	
R213	R-0402 0,1 Вт 2 кОм 5% Yageo	1	
R214	R-0402 0,1 Вт 180 кОм 5% Yageo	1	
R215	R-0402 0,1 Вт 2 кОм 5% Yageo	1	
	<u>Перемикачі</u>		
SB1	KLS7-TS6611-1.5-180 KLS	1	
	<u>Діоди</u>		
VD1- VD24	CZRU52C3V9 Comchip Technology	24	
VD25	SD107WS Diodes Incorporated	1	
	<u>Діоди</u>		
VD26- VD29	MBRS130T3G ON Semiconductor	4	
VD30	BZX84C5V1LT1G ON Semiconductor	1	
	<u>Транзистори</u>		
VT1	A03415A Alpha & Omega Semiconductor Inc.	1	
	<u>Транзистори</u>		
VT2- VT4	ESD5V3U2U Infineon Technologies	3	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ		Арк.
							12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. та дата	

Поз. позначе ння	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Транзистори</u>		
VT5	A03415A Alpha & Omega Semiconductor Inc.	1	
VT6	HE8550G Unisonic Tech	1	
VT7	A03415A Alpha & Omega Semiconductor Inc.	1	
	<u>Роз'єми</u>		
XP1- XP5	0901303108 Molex	5	
XS1	JTAG	1	
XS2	2-406549-1 TE Connectivity AMP Connectors	1	
XS3	5031821852 Molex	1	
XS4	MUSBB15134 Amphenol ICC (Commercial Products)	1	
XS5- XS8	BNC(75)-PLR-PC-12G-1 Hirose Electric Co Ltd	4	
XS9	54-00134 Tensility International Corp	1	
	<u>Кварцеві резонатори</u>		
ZQ1	ECS-240-10-37Q-AES-TR ECS Inc.	1	
	<u>Перетворювач частот</u>		
UZ1	CDCE937PWRG4 Texas Instruments	1	
	<u>Тепловий датчик</u>		
BK1-BK4	ADT7420UCPZ-RL7 Analog Devices Inc	4	

					ДК61.4 11614.001 ПЕЗ			Арк.
								13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Інв. № подл.		Підп. та дата		Взам. інв. №	Інв. № дудл.	Підп. та дата		